

**ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DINÁMICA ESTRUCTURAL
CONSIDERANDO LOS EFECTOS DE LA INTERACCIÓN SUELO
ESTRUCTURA LIMITADA A LOS REQUISITOS DE LA NEC-SE-DS-2015**

DIEGO SANTIAGO LÓPEZ LÓPEZ.
Junio/2020.

Universidad EAFIT
Escuela de Ingeniería.
Maestría en Ingeniería
Asesor: PhD. Juan Carlos Botero P.

RESUMEN

El análisis sísmico y la modelación de estructuras con programas de cómputo comúnmente utilizados en el diseño de edificios, generalmente considera estructuras con base empotrada.

Cuando se consideran las propiedades y el tipo de suelo, en el caso de un estrato blando, éste influye en la atenuación o en la amplificación de la onda, la cual produce variaciones sobre los efectos dinámicos.

Se evalúan los efectos en la respuesta dinámica de un edificio considerando efectos de interacción suelo estructura (ISE) examinando los cambios en el período y el amortiguamiento del sistema, realizando un símil entre la estructura empotrada y la que incluye ISE, de esta manera se pueden comparar las deformaciones y derivas obtenidas en ambos casos.

Este análisis se realiza con el fin de establecer las derivas de piso al tener en cuenta los efectos inerciales, los cuales se considera en las estructuras analizadas con base empotrada.

Se propone además la aplicación de los lineamientos establecidos por la Norma Ecuatoriana de Construcción como apoyo al diseño de proyectos a construirse en el Ecuador sobre esta base normativa.

Se realizó un análisis en varios edificios utilizando relaciones paramétricas y cuyo cálculo se basa en la geometría de la edificación, esto a priori, nos permite conocer si la incidencia de los efectos ISE es significativa.

Se seleccionaron dos edificios con cimentación tipo cajón, en cuyo caso se evalúa paso a paso los efectos sobre el amortiguamiento y el período, producto de la ISE.

Tabla de Contenidos

1.INTRODUCCIÓN.....	1
2.OBJETIVOS.....	3
2.1 General.....	3
2.2 Específicos.....	3
3.MARCO TEÓRICO	4
3.1 Interacción Suelo Estructura.....	4
3.2 Efectos de la Interacción Suelo Estructura	4
3.3 Efectos cinemáticos	4
3.4 Efectos inerciales	5
3.5 Interacción total	5
3.6 Suelo Rígido y Suelo Blando	5
3.7 Módulo de cortante G	6
3.8 Coeficiente de Poisson ν	7
3.9 Densidad del suelo ρ_s	8
3.10 Velocidad de onda de corte V_s	8
3.11 Estratos	8
3.12 Propiedades de respuesta sísmica del suelo.....	8
3.13 Amortiguamiento.....	9
3.14 Deriva	9
3.14.1 Límites permisibles de las derivas de los pisos según NEC-SE-DS -2015	9
3.14.2 Límites de la deriva según NSR (2010).....	10
3.14.3 Control de la deriva de piso (derivadas inelásticas máximas de piso ΔM) en la NEC-SE-DS-2015	10
3.15 Desplazamiento de diseño	11
3.16 Desplazamientos horizontales totales.....	11
3.17 Deformaciones.....	12
3.18 Masa	12
3.19 Rigidez.....	12
3.20 Periodo fundamental de la estructura	13
3.21 Altura equivalente.....	13
4. METODOLOGÍA.....	14
4.1 Cálculo de las propiedades del suelo	14
4.1.1 Cálculo de V_s y G a partir de N_{spt}	14
4.1.2 Pesos específicos y proporción de Poisson.....	14
4.1.3 Período del sitio a través de un estrato equivalente	15
4.1.3.1 Método de formas modales.....	15
4.1.3.2 Método de Rayleigh.....	17
4.1.3.3 Método del recíproco de las lentitudes	17
4.2 Propiedades de la estructura con base empotrada (sin ISE), utilizando el programa ETABS 2016 ®	19
4.2.1 Propiedades de los Materiales	19
4.2.1.1 Hormigón.....	19
4.2.1.1.1 Masa por unidad de volumen del hormigón	19
4.2.1.1.2 Módulo de elasticidad del hormigón	19
4.2.1.2 Acero.....	20
4.2.1.2.1 Límite de fluencia y otras propiedades	20
4.2.2 Cálculo de masa de la estructura considerando la sobrecarga por acabados y mampostería.....	21
4.2.3 Periodo fundamental y porcentajes de masa participante.....	21

4.2.3.1 Cálculo aproximado del período fundamental de vibración aproximado T_a	21
4.2.3.2 Cálculo del período fundamental y frecuencia circular de vibración usando Etabs.	22
a) Período fundamental	22
b) Frecuencia circular de la estructura	22
c) Porcentaje de masa participante y masa equivalente m_e	22
4.2.3.3 Rigidez equivalente de la estructura	23
4.2.3.4 Amortiguamiento	23
a) Amortiguamiento de la estructura	23
4.3 Propiedades de la cimentación	23
4.3.1 Profundidad y base	24
4.3.2 Desplante	24
4.3.3 Radio horizontal	24
4.3.4 Radio de cabeceo	24
4.4 Interacción suelo estructura	24
4.4.1 Valores Paramétricos	25
a) Relación de masas	25
b) Relación de inercias	25
c) Densidad relativa	25
d) Profundidad relativa	25
e) Profundidad de desplante	26
f) Relación de esbeltez	26
g) Rigidez relativa	26
4.4.2 Cálculo del período y amortiguamiento de la estructura con efectos ISE por el método función de transferencia	27
4.4.2.1. Rigideces Estáticas	27
a) Rigidez estática horizontal	27
b) Rigidez estática de cabeceo	27
c) Rigidez estática de acoplamiento	27
4.4.2.2 Factores de rigidez y amortiguamiento	28
a) Frecuencia adimensional del estrato de vibración lateral, a_s :	28
b) Frecuencia adimensional del estrato de vibración vertical, a_p :	28
4.4.2.3 Parámetros variables	28
a) Cálculo de la frecuencia de excitación	28
b) Cálculo de frecuencia adimensional horizontal a_{oh} y frecuencia adimensional de cabeceo a_{oc}	29
a) Relación a_{oh}/a_s y a_{oc}/a_p :	29
4.4.2.4 Factores adimensionales de rigidez (k_h , k_c)	29
a) Rigidez horizontal	29
b) Rigidez de cabeceo	30
4.4.2.5 Factores de amortiguamiento	30
a) Factores de amortiguamiento horizontal, C_h	30
b) Factores de amortiguamiento de cabeceo C_c	31
4.4.2.6 Rigideces dinámicas.	31
a) Rigidez dinámica horizontal	31
b) Rigidez dinámica de cabeceo.	31
4.4.2.7 Constantes dinámicas de amortiguamiento.	32
a) Amortiguamiento dinámico horizontal	32
b) Amortiguamiento dinámico de cabeceo	32
4.4.2.8 Dinámica de estructuras	32
a) Ecuación matricial dinámica de estructuras	32
b) Solución de una matriz compleja	33

5. CASO PRÁCTICO.....	36
5.1.1 Descripción, geometría y ubicación del proyecto.....	36
5.1.2 Cálculo de las propiedades del suelo edificio A.....	38
5.1.2.1 Ensayo SPT en terreno a implantar edificio A.....	38
5.1.2.2 Cálculo de Vs y G a partir de N spt.....	38
5.1.2.3 Cálculo del período para estrato equivalente de edificio A.....	40
a) Aplicación del método de las formas modales.....	40
b) Aplicación del método de Rayleigh.....	41
c) Aplicación del método del recíproco de las lentitudes.....	42
5.1.3 Cálculo de las propiedades de la estructura con base empotrada del edificio A.....	42
5.1.3.1 Modelación del edificio.....	42
5.1.3.2 Período fundamental y porcentajes de masa participante.....	43
a) Cálculo aproximado del período fundamental de vibración aproximado T_e	43
b) Período fundamental de vibración aproximado T_e generado del modelo en ETABS.....	44
5.1.3.3 Cálculo de masa equivalente considerando la sobrecarga por acabados y mampostería.....	44
5.1.3.4 Resultados de las propiedades de la estructura con base empotrada edificio A.....	45
5.1.4 Propiedades de la cimentación.....	46
a) Radio horizontal R_h y Radio de cabeceo R_c	47
5.1.5 Cálculo del período y amortiguamiento de la estructura con efectos ISE.....	47
5.1.5.1 Método función de transferencia.....	47
a) Rigideces Estáticas y factores de Rigidez y amortiguamiento.....	48
b) Parámetros variables.....	48
c) Rigidez horizontal K_h y Rigidez de cabeceo K_c	48
d) Factores de amortiguamiento horizontal y de cabeceo.....	49
e) Matrices de rigidez, masa y amortiguamiento.....	49
f) Vector componente del vector F.....	50
g) Solución de la ecuación matricial dinámica de estructuras.....	50
h) Resultados por el método función de transferencia.....	53
6. CRITERIOS DE DISEÑO.....	56
6.1 Procedimiento de cálculo del Diseño Basado en Fuerzas (DBF) de acuerdo a la NEC-SE-DS-2015, sección 6.3 (2015):.....	56
6.1.1 Pasos del método.....	56
6.1.1.1 Determinación del espectro de diseño $S_a(T)$	56
6.1.1.2 Período fundamental T_a , T o T_e y respuesta elástica de aceleración $S_a(T_a)$	57
6.1.1.3 Determinación del cortante de base V con los resultados de los pasos anteriores. ..	57
6.1.1.4 Representación y determinación de la carga sísmica horizontal:.....	57
6.1.1.5 Cálculo de las fuerzas horizontales aplicando la NEC-SE-DS-2015.....	58
6.1.1.6 Cálculo del cortante basal por medio de la herramienta Etabs® de la estructura empotrada:.....	58
6.2 Dirección de aplicación de las fuerzas sísmicas y verificación de que los índices de deriva no sobrepasen el valor permitido.....	60
6.3 Aplicación de los criterios de diseño para el edificio A (empotrado) sentido X.....	61
6.3.1 Espectro de diseño.....	61
6.3.2 Respuesta elástica de aceleración S_a	63
6.3.3 Cortante Basal.....	63
6.3.4 Cálculo de las fuerzas horizontales.....	63
a) Aplicando las expresiones de la NEC-SE-DS-2015.....	63
b) Cálculo con Etabs ®.....	64
6.3.5 Dirección de aplicación de las fuerzas sísmicas y verificación de que los índices de deriva no sobrepasen el valor permitido.....	65

6.4 Distribución de fuerzas horizontales y derivas calculadas con ISE.	66
6.4.1 S_a para un T_{ISE} en sentido X.....	66
6.4.2 Patrón de carga sísmica (Load Pattern) incluyendo efectos ISE	67
6.4.3 Cortante Basal con ISE	68
6.4.4 Desplazamientos máximos y derivas.....	68
6.4.5 Reducción de los desplazamientos horizontales máximos por efectos ISE en el sentido X	69
6.5 Aplicación de los criterios de diseño para el edificio A (empotrado) sentido Y.....	70
6.5.1 S_a para un T_{ISE} en sentido Y	70
6.5.2 Patrón de Cargas sentido Y.....	70
6.5.3 Cortante Basal y distribución de fuerzas horizontales en el sentido Y.....	70
6.5.3 Desplazamientos máximos y derivas sentido Y, estructura empotrada.....	71
7. Efectos ISE en estructura A con características de suelo blando, caso hipotético	74
7.1 Parámetros para estructura A, tipo de suelo D con $V_s=180$ m /s (hipotético).....	74
7.2 Análisis de efectos ISE	74
7.3 Desplazamientos máximos y derivas	75
7.3.1 Reducción de los desplazamientos horizontales máximos por efectos ISE en el sentido X suelo hipotético.	76
8. Ejemplo de edificación B	77
8.1.1 Descripción, geometría y ubicación del proyecto.....	77
8.1.2 Cálculo de las propiedades del suelo edificio B	79
8.1.3 Cálculo de las propiedades de la estructura con base empotrada del edificio B	80
8.1.3.1 Modelación del edificio	80
8.1.3.2 Resultados del análisis modal de la estructura B empotrada.	81
8.1.4 Parámetros de la fundación.....	81
8.1.4.1 Geometría de la fundación tipo cajón edificio B	81
8.1.4.2 Radio Horizontal y Radio de cabeceo en el sentido X	81
8.1.5 Criterios de diseño para edificación B.....	82
8.1.5.1 Espectro elástico de diseño para la ciudad de Guayaquil para suelo tipo E.	82
8.1.5.2 Cortante Basal calculado para estructura empotrada sentido X	83
8.1.5.3 Derivas y desplazamientos máximos para estructura B con base empotrada en el sentido X.....	83
8.1.6 Análisis de efectos ISE en el sentido X para edificación B.....	84
8.1.7 Cortante Basal calculado para estructura con efectos ISE sentido X.	86
8.1.8 Derivas y desplazamientos máximos para edificio B con efectos ISE en el sentido X.	86
8.2 Reducción de los desplazamientos horizontales máximos por efectos ISE en el sentido X edificio B	87
9. Valores paramétricos	88
a) Relación de masas	88
b) Relación de inercias.....	88
c) Densidad relativa	88
d) Profundidad relativa	88
e) Profundidad de desplante.....	88
f) Relación de esbeltez.....	88
g) Rigidez relativa.....	88
a) Profundidad relativa	88
b) Profundidad de desplante	89
c) Relación de esbeltez	89
d) Rigidez relativa.....	89
9.3 Relación entre Rigidez relativa y variación del T_{ISE}	89

9.3 Número de pisos de estructuras que se ubicarían en la curva descendiente del espectro elástico de diseño.....	91
10. Conclusiones y Recomendaciones.....	93
10.1 Conclusiones.....	93
10.2 Recomendaciones	94
Lista de referencias	95

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de los perfiles de suelo (NEC-SE-DS, 2015)	6
Tabla 2. Valores típicos de velocidad de onda de corte y módulo de cortante	7
Tabla 3. Valores de ΔM máximos, expresados como fracción de la altura de piso	10
Tabla 4. Derivas máximas como porcentaje de hpi	10
Tabla 5. Correlaciones entre valores de N y Vs	14
Tabla 6. Valores de pesos específicos típicos.....	14
Tabla 7. Valores o rangos para la proporción de Poisson.	14
Tabla 8. Valores calculados de Ec para algunos f'c	19
Tabla 9. Mass Summary by Group	21
Tabla 10. Valores de C_t y α	21
Tabla 11. Períodos y porcentaje de Participación modal.....	22
Tabla 12. Distribución de plantas en altura edificio A	36
Tabla 13. Secciones de columnas y muros edificio A.....	36
Tabla 14. Ensayo de penetración estándar (SPT).	38
Tabla 15. Valores de Vs y G para P-33	39
Tabla 16. Valores de Vs y G para P-34	39
Tabla 17. Valores de G a partir de Vs en el método de las formas modales.	40
Tabla 18. Matrices de masa y rigidez por estrato	40
Tabla 19. Matriz de masa del sistema.....	40
Tabla 20. Matriz de rigidez del sistema.....	41
Tabla 21. Cálculo del período del estrato equivalente (edificio A).....	41
Tabla 22. Método de Rayleigh	41
Tabla 23. Valores de G y Vs en el método del recíproco de las lentitudes.	42
Tabla 24. Cálculo del período aproximado de edificio A.....	43
Tabla 25. Períodos y porcentaje de Participación modal.....	44
Tabla 26. Masa equivalente	44
Tabla 27. Resultados de las propiedades de la estructura.....	45
Tabla 28. Resumen de parámetros de la fundación	47
Tabla 29. Resumen de parámetros de edificio A.....	47
Tabla 30. Valores de Rigideces Estáticas, Factores de Rigidez y amortiguamiento.....	48
Tabla 31. Valores de los Parámetros variables para algunos T_i	48
Tabla 32. Factores adimensionales de rigidez	49
Tabla 33. Factores adimensionales de amortiguamiento.....	49
Tabla 34. Matrices K, M y C para un $T_i = 0.3$ s.....	49
Tabla 35. Matrices K, M y C para un $T_i = 2.873$ s.....	49
Tabla 36. Matrices K, M y C para un $T_i = 4.0$ s.....	49
Tabla 37. Vector f componente de $\{F\}$	50
Tabla 38. Matrices A y B para un $T_i = 0.3$ s.....	50
Tabla 39. Matrices A y B para un $T_i = 2.873$ s.....	50
Tabla 40. Matrices A y B para un $T_i = 4.0$ s.....	50
Tabla 41. Cálculo de Matriz C para un $T_i = 0.3$ s.....	51
Tabla 42. Cálculo de Matriz C para un $T_i = 2.873$ s.....	51
Tabla 43. Cálculo de Matriz C para un $T_i = 4.0$ s.....	51
Tabla 44. Matriz D para un $T_i = 0.3$ s.....	51
Tabla 45. Matriz D para un $T_i = 2.873$ s.....	52
Tabla 46. Matriz D para un $T_i = 4.0$ s.....	52
Tabla 47. Matriz Z^{-1} para un $T_i = 0.3$ s.....	52
Tabla 48. Matriz Z^{-1} para un $T_i = 2.873$ s.....	52
Tabla 49. Matriz Z^{-1} para un $T_i = 4.0$ s.....	52
Tabla 50. Vector de desplazamientos para un $T_i = 0.3$ s.....	53

Tabla 51. Vector de desplazamientos para un $T_i = 2.873$ s	53
Tabla 52. Vector de desplazamientos para un $T_i = 4.0$ s	53
Tabla 53. Valores de $T_i T_e$ vs. $\omega e 2. U \ddot{x} g$ para estructura A.....	54
Tabla 54. Factor K.....	59
Tabla 55. Tipo de perfil de suelo.....	61
Tabla 56. Valores paramétricos para determinar el espectro de diseño	61
Tabla 57. Valores del espectro generado por Etabs®	62
Tabla 58. Fuerzas cortantes por piso cálculo manual	64
Tabla 59. Fuerzas horizontales obtenidas en Etabs®	64
Tabla 60. Control de derivas, aplicando las fuerzas horizontales en el sentido X estructura empotrada, parámetros de suelo reales.	66
Tabla 61. Control de derivas, aplicando las fuerzas horizontales en el sentido X considerando efectos ISE, parámetros de suelo reales.....	68
Tabla 62. Reducción de desplazamientos por efecto ISE en estructura A, parámetros de suelo reales.....	69
Tabla 63. Coeficientes para cálculo de Cortante Basal y FHEY	70
Tabla 64. Control de derivas, aplicando las fuerzas horizontales en el sentido Y sin considerar efectos ISE	71
Tabla 65. Parámetros para cálculo de período ISE en el sentido Y, estructura A.....	72
Tabla 66. Función de transferencia, sentido Y, edificio A	72
Tabla 67. Parámetros estructura A, caso hipotético	74
Tabla 68. Función de transferencia edificio A, suelo con $V_s=180$ m/s.....	74
Tabla 69. Coeficientes para cálculo de Cortante Basal y FHEX, suelo $V_s=180$ m/s.....	75
Tabla 70. Control de derivas, aplicando las fuerzas horizontales en el sentido X con efectos ISE, para suelo hipotético $V_s=180$ m/s, edificio A	75
Tabla 71. Reducción de desplazamientos por efecto ISE en estructura A, parámetros de suelo más blando.....	76
Tabla 72. Distribución de plantas en altura edificio A	78
Tabla 73. Secciones edificio tipo B.....	78
Tabla 74. Parámetros del suelo edificio B.....	80
Tabla 75. Masa de la estructura B	81
Tabla 76. Período y participación modal de estructura B.....	81
Tabla 77. Radio horizontal y radio de cabeceo fundación edificio B.....	81
Tabla 78. Espectro elástico de diseño suelo tipo E, zona 5	82
Tabla 79. Coeficientes para cálculo de cortante basal y FHEX estructura B.....	83
Tabla 80. Control de derivas, aplicando las fuerzas horizontales en el sentido X sin considerar efectos ISE, edificio B	84
Tabla 81. Parámetros para cálculo de efectos ISE estructura B, sentido X.....	84
Tabla 82. Función de transferencia edificio B, sentido X	85
Tabla 83. Coeficientes para cálculo de cortante basal y FHEX con ISE estructura B	86
Tabla 84. Control de derivas, aplicando las fuerzas horizontales en el sentido X con efectos ISE, edificio B	87
Tabla 85. Reducción de desplazamientos por efecto ISE en edificio B sentido X.....	87
Tabla 86. Relación de Rigidez vs % aumento T_e	89
Tabla 87. Número de pisos mínimo aproximado que se ubican en la zona descendente del espectro, en suelos blandos, ciudades importantes.....	91
Tabla 88. Coeficientes según tipo de edificio.....	92

Lista de figuras

Figura 1. Modificación del movimiento del campo libre	4
Figura 2. Sistema equivalente de n grados de libertad para n estratos.	15
Figura 3. Esquema de superposición de matrices.....	16
Figura 4. Sistema de n grados de libertad a sistema de un grado de libertad	17
Figura 5. Propagación de ondas en n estratos.....	18
Figura 6. Estrato equivalente, período para el primer modo	18
Figura 7. Imagen de ETABS 2016, propiedades para concreto de 35 MPa.....	20
Figura 8. Imagen de ETABS 2016, propiedades acero de refuerzo $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$	20
Figura 9. Vista en planta de cimentación tipo cajón.....	23
Figura 10. Desplante en cimentación tipo cajón.....	24
Figura 11. Rigidez horizontal	29
Figura 12. Rigidez de cabeceo.....	30
Figura 13. Amortiguamiento horizontal	30
Figura 14. Función de transferencia.	35
Figura 15. Mapa de la ubicación del Resort Playa Azul.	36
Figura 16. Arquitectura de Torre, vista lateral.	36
Figura 17. Planta tipo A.....	37
Figura 18. Planta tipo B.....	37
Figura 19. Perfil del suelo según los sondeos P-33.	39
Figura 20. Propiedades asignadas para losa de edificio A	42
Figura 21. Modelación del edificio A en ETABS 2016.	43
Figura 22. Planta de cimentación	46
Figura 23. Cimentación sentido X-X.....	46
Figura 24. Cimentación sentido Y-Y.....	46
Figura 25. Función de transferencia edificio A.	54
Figura 26. Espectro de diseño.....	56
Figura 27. Ventanas de patrón de carga sísmica en Etabs ®.....	59
Figura 28. Fuerzas horizontales y cortante Basal	59
Figura 29. Máximos desplazamientos por piso	60
Figura 30. Espectro elástico de diseño	62
Figura 31. Espectro elástico de diseño en Etabs®.....	62
Figura 32. Espectro elástico de diseño	63
Figura 33. Cortantes por piso sentido X-X.....	65
Figura 34. Desplazamientos máximos para FHEX, estructura A, empotrada.....	65
Figura 35. S_a para T_{ISE} sentido x.....	67
Figura 36. Distribución de fuerzas horizontales Estructura A con efectos ISE	68
Figura 37. S_a para T_{ISE} en sentido Y, estructura A	70
Figura 38. Patrón de carga sísmica estructura A sentido Y, empotrada.....	70
Figura 39. Distribución de fuerzas horizontales en sentido Y, estructura A, empotrada.	70
Figura 40. Desplazamiento máximo aplicando las fuerzas horizontales en el sentido Y sin considerar efectos ISE	71
Figura 41. Función de transferencia, sentido Y, edificio A.....	72
Figura 42. Función de transferencia edificio A, suelo con $V_s=180\text{m/s}$	74
Figura 43. S_a para T_{ISE} en sentido X, estructura A suelo $V_s=180\text{m/s}$	75
Figura 44. Edificio Malena, Edificio B	77
Figura 45. Plantas tipo de edificio B	77
Figura 46. Planta Tipo C	78
Figura 47. Secciones de vigas planta tipo A, edificio B.....	79
Figura 48. Secciones de vigas, planta tipo B, edificio B.....	79

Figura 49. Secciones de vigas planta tipo C, edificio B	79
Figura 50. Modelo de edificio B.....	80
Figura 51. Cimentación edificio B	81
Figura 52. Espectro elástico de diseño para suelo tipo E zona V	82
Figura 53. S_a para T_e estructura B sentido X.....	83
Figura 54. Distribución de cortante para sentido X, estructura B	83
Figura 55. Desplazamientos máximos para FHEX, estructura B	83
Figura 56. Función de transferencia, edificio B, sentido X.....	85
Figura 57. S_a para T_{ise} estructura B, sentido X	86
Figura 58. Distribución de cortante para sentido X, estructura B con ISE.....	86
Figura 59. Desplazamientos máximos para FHEX con ISE, estructura B	86
Figura 60. Rigidez relativa vs. % Aumento T_e (relación de esbeltez $R_E= 5.40$).....	90
Figura 61. Rigidez relativa vs. % disminución ξ_e (relación de esbeltez $R_E= 5.40$).....	90
Figura 62. T_c , Período que limita la zona plana del espectro.....	91

1.INTRODUCCIÓN

Los diseñadores generalmente han considerado para el análisis de una estructura el supuesto que las fuerzas estáticas horizontales equivalentes o el movimiento que se aplica en su base son independientes de su cimentación. Usualmente, se analizan las estructuras considerando modelos con base empotrada; sin embargo, la influencia que tiene un estratoblando resulta importante en la variación producida sobre los efectos dinámicos.

A través de este documento se busca evaluar los efectos en la respuesta dinámica de varios edificios considerando los efectos de interacción suelo estructura (ISE) enfocándose en las variaciones del período del sistema y el amortiguamiento del mismo, haciendo una comparación entre el modelo de la estructura empotrada y la que incluye ISE, con el fin de evaluar las diferencias en deformaciones y en derivas.

Se propone además la aplicación de los límites establecidos por la Norma Ecuatoriana de Construcción con respecto a las derivas de piso, aportando a los diseños estructurales de proyectos a construirse en el Ecuador.

El presente trabajo se basa en las publicaciones de: Avilés J y Pérez-Rocha L E (1996); Avilés J y Pérez-Rocha L E (2002).

Por lo extenso del tema y por el enfoque dado a la investigación, no se profundiza en el desarrollo del cálculo de las propiedades dinámicas de la estructura sin ISE, el marco teórico detrás de los cálculos de período fundamental, amortiguamiento, formas modales etc., el cual se podrá encontrar en la bibliografía de referencia.

La determinación de las propiedades del suelo tales como el módulo de cortante, velocidad de onda de corte y densidad del material se deben realizar a través de ensayos de laboratorio señalados por la mecánica de suelos. El presente trabajo no incluye la literatura detrás de la obtención de estas propiedades; sin embargo, ciertas ecuaciones se irán incluyendo a medida que se requieran.

El objetivo es hacer un análisis que determine si aumentan o disminuyen las derivas de piso cuando se toma en cuenta los efectos inerciales producidos por la ISE con referencia a cuando estos no son considerados y se buscará hacer una comparación entre estas dos condiciones.

Según la NEC-SE-DS-2015 (Norma Ecuatoriana de Construcción) se debe incluir en el cálculo de las derivas de piso los efectos de segundo orden de efectos P-delta por lo que los resultados finales de esta comparación aún no se podrán usar en un diseño final.

Se pretende aplicar esta secuencia del análisis dentro del marco de la Norma Ecuatoriana de Construcción vigente, la aplicación práctica se enfocará en las ciudades de Quito y Atacames; pero se señalarán los factores que varíen de acuerdo a las NEC-SE-DS-2015 y poder aplicarlos en diferentes zonas, tipo de suelo distinto o variables dependientes del tipo de estructura o su uso, a fin de poder emplearla en distintas ciudades y para estructuras que por materiales y por metodología constructiva han ido creando un diseño típico ecuatoriano.

2.OBJETIVOS

2.1 General

Analizar la respuesta dinámica estructural incluyendo los efectos de interacción suelo estructura compararla con una estructura empotrada y limitar los resultados con requisitos de la NEC-SE-DS-2015 para su aplicabilidad.

2.2 Específicos

- Determinar las estructuras en las que los efectos de ISE son relevantes.
- Realizar análisis dinámico sin considerar efectos de Interacción Suelo Estructura (base empotrada).
- Calcular las propiedades del suelo tomando Atacames como ciudad específica para el estudio.
- Establecer las propiedades de la cimentación.
- Establecer las propiedades de la estructura con ISE.
- Definir el concepto de deriva según la NEC-SE-DS-2015
- Encontrar las derivas por el método Fuerza Horizontal Equivalente regido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS-2015) y NSR-10 sin ISE y con ISE.
- Encontrar las derivas por el método Análisis Modal Espectral regido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS-2015) y NSR-10 sin ISE y con ISE.
- Valorar los resultados basándonos en las derivas y en la relación de rigidez.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Interacción Suelo Estructura

La respuesta de una estructura frente a terremotos depende además de la estructura, del suelo adyacente y del terreno en movimiento.

El efecto de interacción suelo-estructura (ISE) es “el mecanismo por el cual la presencia de la estructura influye en el movimiento del terreno” (Soriano, 1989) y consiste en la diferencia entre la respuesta de un punto donde está situada una estructura y la respuesta que debería experimentar ese punto si la estructura no estuviera (Espinoza, 1999), tal como se ilustra en la *Figura 1* donde sí difieren los movimientos en el punto A, debido a interacción suelo-estructura (Rosenblueth, 1992).

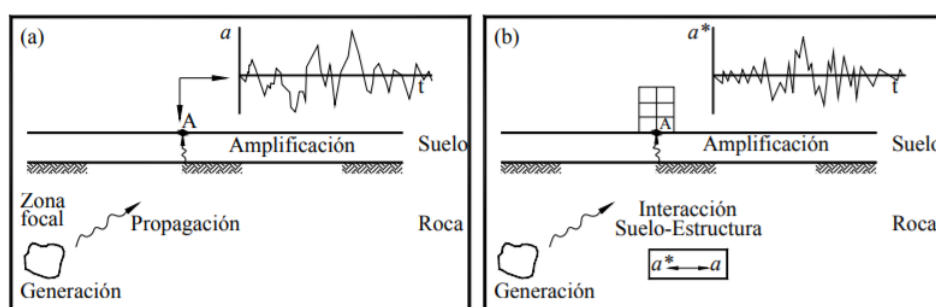


Figura 1. Modificación del movimiento del campo libre¹

La interacción modifica las propiedades dinámicas relevantes que tendría la estructura supuesta con base indeformable, así como las características del movimiento del terreno alrededor de la cimentación (Avilés y Pérez-Rocha, 2004).

3.2 Efectos de la Interacción Suelo Estructura

El efecto de interacción dinámica suelo-estructura consiste en un conjunto de efectos cinemáticos e inerciales producidos en la estructura y el suelo, como resultado de la flexibilidad de este ante solicitaciones dinámicas. (Kausel et al., 1978)

3.3 Efectos cinemáticos

La excitación efectiva de la cimentación está compuesta tanto de traslaciones como de rotaciones. Debido al efecto promediador de la cimentación, las traslaciones sufren reducciones y las rotaciones aparecen.

¹ Considerando un cambio de aceleración ($=a$) mostrada en la gráfica de a vs. t , y (b) una aceleración a^* que cambia debido a la presencia de estructuras (Soriano, 1989)

Si la amplificación del sitio es considerada para determinar el movimiento sísmico en la superficie del terreno y esta se asigna como la excitación de diseño aplicada a nivel de la cimentación, en general esta excitación resulta ser más desfavorable que el movimiento efectivo que se obtiene de un análisis de interacción cinemática. Una excitación que no considera efectos de interacción cinemática suelo-cimentación es un efecto conservador.

Se puede decir que hay interacción cinemática cuando la base experimenta algún desplazamiento horizontal promedio y un cabeceo, llamado movimiento de entrada efectiva a la cimentación (Espinoza, 1999).

3.4 Efectos inerciales

Si consideramos el período fundamental de un sistema suelo-estructura, este se ve incrementado con respecto a un hipotético empotramiento sobre un medio indeformable, esto debido a que el conjunto tiene una flexibilidad mayor que la de una estructura desplantada sobre este medio.

Si hablamos del amortiguamiento generalmente aumenta debido a una disipación adicional de energía producto de los amortiguamientos material y geométrico del suelo. Sin embargo, como la interacción disminuye la efectividad del amortiguamiento estructural, se puede presentar una reducción del sistema cuando la disipación adicional de energía brindada por el suelo no compense dicha disminución. (Avilés)

La modificación por interacción del período fundamental, el amortiguamiento y la ductilidad pueden dar lugar a respuestas estructurales mayores o menores, dependiendo de la posición de los periodos resonantes del espectro de respuesta y de los niveles de amortiguamiento y ductilidad.

3.5 Interacción total

La suma de la interacción producida por efectos cinemáticos e inerciales nos da como resultado la Interacción total.

3.6 Suelo Rígido y Suelo Blando

La Norma Ecuatoriana de Construcción NEC-SE-DS-2015, señala los siguientes perfiles de suelo para el diseño sísmico:

Se definen seis tipos de perfil de suelo los cuales se presentan en la Tabla 1.

Los parámetros utilizados en la clasificación son los correspondientes a los 30 m superiores del perfil para los perfiles tipo A, B, C, D y E. Aquellos perfiles que tengan estratos claramente diferenciados deben subdividirse, asignándoles un subíndice i que va desde 1 en la superficie, hasta n en la parte inferior de los 30 m superiores del perfil.

Para el perfil tipo F se aplican otros criterios, como los expuestos en la sección 10.5.4 y la respuesta no debe limitarse a los 30 m superiores del perfil en los casos de perfiles con espesor de suelo significativo.

Tabla 1. Clasificación de los perfiles de suelo (NEC-SE-DS, 2015)

TIPO DE PERFIL	DESCRIPCIÓN	DEFINICIÓN
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > V_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360$ m/s
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180$ m/s
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ $100 \text{ kPa} > S_u \geq 50 \text{ kPa}$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180$ m/s
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50 \text{ kPa}$
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases:	
	F1—Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como; suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.	
	F2—Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas ($H > 3$ m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).	
	F3—Arcillas de muy alta plasticidad ($H > 7.5$ m con índice de Plasticidad $IP > 75$)	
	F4—Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda ($H > 30$ m)	
	F5—Suelos con contrastes de impedancia α ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte	
	F6—Rellenos colocados sin control ingenieril	

3.7 Módulo de cortante G

Se define como la pendiente de la línea que une los extremos de la curva cíclica de esfuerzo cortante y deformación angular.

Para tener una relación entre el módulo G y la velocidad de onda de corte se tiene la siguiente ecuación:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1)$$

Donde:

G Módulo de cortante del suelo

ρ Peso unitario del suelo

Para estimar el valor de G existen una gran cantidad de correlaciones con base en otras propiedades de los suelos o resultados de ensayos de campo.

Se indican algunos valores de G . Como vemos en la Tabla 2 el rango es muy amplio para cada tipo de suelo lo que limita el uso de esta, pero servirá para tener una idea del valor de lo que los estudios de suelo deberían mostrar.

Tabla 2. Valores típicos de velocidad de onda de corte y módulo de cortante

Tipo de suelo	Densidad ρ	Peso Unitario ρ	Velocidad de onda de corte V_s		Módulo de cortante G	
	kg/m ³	pcf*	m/s	ft/s	kPa	psi
Arcilla suave	1.600	100	40 - 90	130 - 300	2.600 - 1300	400 - 2000
Arcilla dura	1.680	105	65 - 140	210-500	7.000 - 3.300	1.000 - 5.700
Arena suelta	1.680	105	130 - 280	420-920	28.400 - 131.700	4.000 - 19.200
Arena densa y grava	1.760	110	200 - 410	650 - 1.350	70.400 - 300.000	10.000 - 43.300
Suelos residuales (PWR, IGM)	2.000	125	300 - 600	1.000 - 2.000	180.000 - 720.000	27.000 - 108.000
Rocas metamórficas e Igneas de piedemonte (alta y moderadamente desgastadas)	2.500	155	760 - 3.000	2.500 - 10.000	1.400.000 - 22.500.000	209.000 - 3.400.000
0 < RQD < 50 RQD** = 65 ⁽¹⁾ RQD = 80 ⁽¹⁾ RQD = 90 ⁽¹⁾ RQD = 100 ⁽¹⁾			600 760 1.500 2.500 3.400	2.000 2.500 5.000 8.000 11.000		
Rocas sedimentarias (moderadamente desgastadas a intactas)	2.600	165	> 3.400	> 11.000	> 30.000	> 4.300.000

⁽¹⁾ Valores típicos, interpolación lineal entre valores de RQD. *Libras por pie cúbico, **Rock Quality Designation. (Hunt, 1984 y Kavazanjian, 1998).

3.8 Coeficiente de Poisson ν

Es la relación entre la deformación lateral y la axial. El coeficiente de Poisson se puede medir como: la razón entre el acortamiento de una longitud situada en un plano perpendicular

a la dirección de la carga aplicada, dividido en el alargamiento longitudinal producido. Este valor coincide igualmente con el cociente de deformaciones, de hecho, la fórmula usual para el coeficiente de Poisson es (Ortiz, 1998):

$$\nu = -\frac{\epsilon_{trans}}{\epsilon_{long}} \quad (2)$$

Donde:

ϵ_{trans} Deformación transversal

ϵ_{long} Deformación longitudinal

3.9 Densidad del suelo ρ_s

Se define como la relación entre la masa del suelo y el volumen ocupado.

3.10 Velocidad de onda de corte V_s

Velocidad con que se propagan las ondas S, las cuales están controladas por el módulo de corte y la densidad del suelo.

3.11 Estratos

Son franjas de suelo que presentan propiedades similares. Estos modifican las ondas sísmicas en sus límites de contacto, generando efectos de difracción múltiple, produciendo amplificaciones y atenuaciones. Lo anterior dado según las características del estrato, las cuales determinan el período del sitio y el amortiguamiento del suelo.

3.12 Propiedades de respuesta sísmica del suelo

Determinación de las propiedades de respuesta sísmica del suelo en laboratorio según NEC-SE-GC-2015:

Las propiedades dinámicas del suelo, y en particular el módulo de rigidez al cortante, G , y el porcentaje de amortiguamiento con respecto al crítico, ξ , a diferentes niveles de deformación, se determinan en el laboratorio mediante ensayos de columna resonante, ensayo triaxial cíclico, corte simple cíclico u otro similar **técnicamente sustentado (NEC-SE-GC-2015) / técnicamente reconocido (NSR-10)**. Los resultados de estos ensayos se interpretarán siguiendo métodos y criterios reconocidos, de acuerdo con el principio de operación de cada uno de los aparatos.

En todos los casos, se deberá tener presente que los valores de G y ξ obtenidos están asociados a los niveles de deformación impuestos en cada aparato y pueden diferir de los prevalecientes en el campo. Si es que no se cuenta con los equipos mencionados, se podría utilizar modelos de estimación (correlación) de las curvas de degradación de rigidez y

amortiguamiento con el nivel de deformación por cortante unitaria que cumplan con las características geotécnicas de los suelos analizados, considerando la incertidumbre en la aplicación de los modelos de estimación.

NOTA: En todo caso se debería de averiguar las propiedades de respuesta sísmica de suelo de acuerdo con la Sección 10.6 de la NEC-SE-DS.

Revisando en paralelo las NEC-SE-GC-2015 con la NSR 10, el procedimiento para la caracterización geomecánica se detallada de manera igual, cambiando únicamente la frase señalada en negrita.

3.13 Amortiguamiento

Es la propiedad del material que permite disipar energía, produciendo que la amplitud de la vibración disminuya de manera constante. Con el amortiguamiento, la energía del sistema de vibración se disipa por diversos mecanismos y, con frecuencia, más de un mecanismo puede estar presente al mismo tiempo. La mayor parte de la disipación de la energía puede ser asociada al efecto térmico del esfuerzo elástico repetido del material y de la fricción interna que se produce en un sólido cuando se deforma. Sin embargo, en las estructuras reales existen muchos otros mecanismos que también contribuyen a la disipación de la energía. (Chopra,2014)

3.14 Deriva

Norma ecuatoriana:

“Diferencia relativa del desplazamiento de diseño entre la parte superior e inferior de un piso, dividido por la altura del piso” (NEC-SE-HM, 2010).

Norma colombiana:

“Se entiende por deriva el desplazamiento horizontal relativo entre dos puntos colocados en la misma línea vertical, en dos pisos o niveles consecutivos de la edificación” (NSR-10, 2010).

3.14.1 Límites permisibles de las derivas de los pisos según NEC-SE-DS -2015

La deriva máxima para cualquier piso no excederá los límites de deriva inelástica establecidos en la tabla 3, en la cual la deriva máxima se expresa como un porcentaje de la altura de piso: Valores de ΔM máximos, expresados como fracción de la altura de piso:

Tabla 3. Valores de ΔM máximos, expresados como fracción de la altura de piso

Estructuras de:	ΔM máxima (sin unidad)
Hormigón armado, estructuras metálicas y de madera	0.02
De mampostería	0.01

3.14.2 Límites de la deriva según NSR (2010)

La deriva máxima para cualquier piso determinada de acuerdo con el procedimiento de A.6.3.1, no puede exceder los límites establecidos en la tabla A.6.4-1, en la cual la deriva máxima se expresa como un porcentaje de la altura de piso h_{pi} :

Tabla 4. Derivas máximas como porcentaje de h_{pi}

Estructuras de:	Deriva máxima	
Concreto reforzado, metálicas, de madera, y de mampostería que cumplen los requisitos de A.6.4.2.2	$1.0\%(\Delta_{max}^i \leq 0.010 h_{pi})$	(3)
De mampostería que cumplen los requisitos de A.6.4.2.3	$0.5\%(\Delta_{max}^i \leq 0.005 h_{pi})$	(4)

3.14.3 Control de la deriva de piso (derivas inelásticas máximas de piso ΔM) en la NEC-SE-DS-2015

Para este apartado se trasladó exactamente el contenido del control de la deriva y su respectivo cálculo de la NEC-SE-DS-2015, con el fin de aclarar nomenclatura, pasos, reglas y demás.

Se hará un control de deformaciones, a través del cálculo de las derivas inelásticas máximas de piso. El diseñador deberá comprobar que la estructura presentará deformaciones inelásticas controlables, mejorando substancialmente el diseño conceptual.

Los valores máximos se han establecido considerando que el calculista utilizará secciones agrietadas, véase la (sección 6.1.6-b NEC-SE-DS-2015) sobre agrietamiento e inercia I_g .

Para la revisión de las derivas de piso se utilizará el valor de la respuesta máxima inelástica en desplazamientos ΔM de la estructura, causada por el sismo de diseño.

Las derivas obtenidas como consecuencia de la aplicación de las fuerzas laterales de diseño reducidas por el método DBF (Diseño Basado en Fuerzas) sean estáticas o dinámicas, para cada dirección de aplicación de las fuerzas laterales, se calcularán, para cada piso, realizando un análisis elástico de la estructura sometida a las fuerzas laterales calculadas.

El cálculo de las derivas de piso incluirá:

- Las deflexiones debidas a efectos traslacionales y torsionales (véase en la sección 6.3.7 de NEC-SE-HM,2015)
- Los efectos de segundo orden $P-\Delta$ (véase en la sección 6.3.8 de NEC-SE-HM,2015)

Adicionalmente, en el caso de pórticos con estructura metálica, debe considerarse la contribución de las deformaciones de las zonas de conexiones a la deriva total de piso.

Límites de la deriva: la deriva máxima inelástica ΔM de cada piso debe calcularse mediante:

$$\Delta M = 0.75R\Delta E \quad (5)$$

Dónde:

ΔM Deriva máxima inelástica.

R Factor de reducción de resistencia (véase la sección 6.3.4 NEC-SE-HM,2015)

ΔE Desplazamiento obtenido en aplicación de las fuerzas laterales de diseño reducidas.

Regla: ΔM no puede superar los valores establecidos en la Tabla 3, los cuales deben satisfacerse en todas las columnas del edificio.

Se verificará que:

$$\Delta M < \Delta M \text{ máxima} \quad (6)$$

Dónde:

ΔM Máxima se determina conforme a la sección 3.14.1

3.15 Desplazamiento de diseño

Desplazamiento lateral total esperado para el sismo de diseño, según lo requerido por la NEC-SE-HM,2015

3.16 Desplazamientos horizontales totales

Los desplazamientos horizontales, se determinan por medio del análisis estructural realizado utilizando el método de análisis definido en A.3.4 (NSR,2010) y con las rigideces indicadas según el criterio del ingeniero diseñador. Los desplazamientos totales horizontales,

$\delta_{tot,j}$, en cualquiera de las direcciones principales en planta, j, y para cualquier grado de libertad de la estructura, se obtienen de la siguiente suma de valores absolutos:

$$\delta_{tot,j} = |\delta_{cm,j}| + |\delta_{t,j}| + |\delta_{pd,j}| \quad (7)$$

Donde:

$\delta_{cm,j}$ corresponde al desplazamiento horizontal del centro de masa en la dirección bajo estudio, j.

$\delta_{t,j}$ el desplazamiento adicional causado por los efectos torsionales en la dirección bajo estudio cuando el diafragma sea rígido, j.

$\delta_{pd,j}$ al desplazamiento adicional causado por el efecto P-Delta en la dirección bajo estudio, j.

Cuando se utilicen los procedimientos de interacción suelo-estructura, o cuando el método de análisis a utilizar así lo requiera porque se realizó el análisis de la estructura suponiéndola empotrada en su base, deben incluirse dentro de los desplazamientos totales, los desplazamientos adicionales obtenidos de acuerdo con el procedimiento del Capítulo A.7. (NSR, 2010)

3.17 Deformaciones

Limitación de daños como lo define la NEC-SE-DS-2015:

La estructura presentará las derivas de piso, ante las fuerzas especificadas por esta norma, inferiores a los admisibles definidos en la sección 4.2.2. (Límites permisibles de las derivas de los pisos).

$$\Delta M < \Delta M \text{ máxima} \quad (8)$$

Dónde:

ΔM Deriva de piso máxima horizontal inelástico

3.18 Masa

Es la propiedad de un sistema estructural que permite cuantificar la cantidad de materia del sistema físico en estudio.

3.19 Rigidez

Propiedad de un sistema estructural que mide la fuerza necesaria para generar un desplazamiento unitario.

3.20 Periodo fundamental de la estructura

Todas las estructuras poseen diferentes modos de vibración. El modo principal es el "fundamental". Se puede definir como el período de la oscilación que domina la respuesta. El periodo fundamental es el periodo del modo que tiene mayor porcentaje de participación de la masa. Es el mayor período de vibración de la estructura en la dirección horizontal de interés. (NEC-SE-DS,2015)

3.21 Altura equivalente

De acuerdo a NSR-10, puede estimarse simplificadaamente como:

$$h_e = 0.75h_n \quad (9)$$

Donde:

h_n es la altura de la edificación

La norma ecuatoriana denomina la altura efectiva como H_{eff} y esta define el centroide de las fuerzas inerciales generadas por el primer modo de vibración (NEC-SE-DS, 2015):

$$H_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i H_i)}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)} \quad (10)$$

Donde:

H_i Altura del nivel i del edificio

H_{eff} Altura efectiva

Δ_i Desplazamiento de diseño para el piso i

m_i Masa del piso i

4. METODOLOGÍA.

4.1 Cálculo de las propiedades del suelo

Preliminarmente se calculan en base a correlaciones la velocidad de onda, módulo de cortante, peso específico y módulo de Poisson, necesarias en la aplicación de las metodologías para obtener los períodos del sitio a través de un estrato equivalente compuesto por n estratos, discretizados en la dirección vertical.

4.1.1 Cálculo de V_s y G a partir de N spt

Tabla 5. Correlaciones entre valores de N y V_s

INVESTIGADORES	ECUACIÓN	
IMAI Y YOSHIMURA (1990)	$V_s = 76 N^{0.33}$	(11)
OHBA Y TORIUMI (1970)	$V_s = 84 N^{0.31}$	(12)

Fuente: *A Correlation of Shear Wave Velocity and Standard Penetration Resistance*, Aminaton Marto et. Al. (1993)

4.1.2 Pesos específicos y proporción de Poisson.

Tabla 6. Valores de pesos específicos típicos

PESOS ESPECÍFICOS TÍPICOS			
Tipo de suelo	Clasificación SUCS (ASTM D2487)	Sobre el nivel freático (KN/m3)	Bajo el nivel freático (KN/m3)
Gravas mal gradadas	GP	17.5-20.5	19.5-22.0
Gravas bien gradadas	GW	17.5-22.0	19.5-23.5
Gravas limosas	GM	16.0-20.5	19.5-22.0
Gravas arcillosas	GC	16.0-20.5	19.5-22.0
Arenas mal gradadas	SP	15.0-19.5	19.0-21.0
Arenas bien gradadas	SW	15.0-21.0	19.0-23.0
Arenas limosas	SM	12.5-21.0	17.5-22.0
Arenas arcillosas	SC	13.5-20.5	17.5-21.0
Limos de baja plasticidad	ML	11.5-17.5	12.5-20.5
Limos de alta plasticidad	MH	11.5-17.5	11.5-20.5
Arcillas de baja plasticidad	CL	12.5-17.5	11.5-20.5
Arcillas de alta plasticidad	CH	12.5-17.5	11.0-19.5

Fuente: *Principios de ingeniería de cimentaciones*, Braja Das, (2001)

Tabla 7. Valores o rangos para la proporción de Poisson.

TYPE OF SOIL	μ
Clay, saturated	0.4-0.5
Clay, unsaturated	0.1-0.3
Sandy clay	0.2-0.3
Silt	0.3-0.35

Sand, gravelly sand Commonly used	
rock	0.1-0.4(depends somewhat on type of rock)
loess	0.1-0.3
ice	0.36
concrete	0.15
steel	0.33
μ	SOIL TYPE
0.4-0.5	Most clay soils
0.45-0.50	Saturated clay soils
0.3-0.4	Cohesionless-medium and dense
0.2-0.35	Cohesionless-loose to medium

4.1.3 Período del sitio a través de un estrato equivalente

4.1.3.1 Método de formas modales

Esta metodología sigue el mismo principio de la dinámica estructural de un sistema de varios grados de libertad en el cual se concentran las masas de cada piso en un solo punto, de esta manera se generan n grados de libertad para n pisos, solo que en este caso no se tienen pisos sino estratos de suelo (figura 2), los cuales tienen propiedades como peso específico, módulo de cortante, altura del estrato, entre otros.

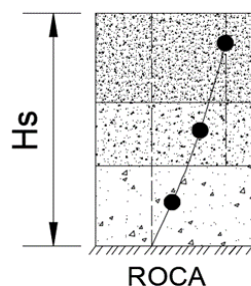


Figura 2. Sistema equivalente de n grados de libertad para n estratos.

El método consiste en obtener las sub matrices de masa $[M]$ y rigidez $[K]$ como se muestra a continuación:

$$[M_i] = \frac{\gamma_i H_i}{g} \begin{bmatrix} 1/3 & 1/6 \\ 1/6 & 1/3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[K_i] = \frac{G_i}{H_i} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Donde:

- γ Peso específico de cada estrato
- H Altura del cada estrato
- g Constante de la gravedad
- G_i Módulo de cortante de cada estrato

A partir de las sub matrices podemos elaborar la matriz de masa y rigidez del depósito de suelo [M], [K]:

$$[M], [K] = \begin{bmatrix} \begin{array}{|c|c|c|} \hline * & * & \\ \hline * & * & * \\ \hline & * & * \\ \hline \end{array} & 0 \\ 0 & \begin{array}{|c|c|c|} \hline * & * & \\ \hline * & * & * \\ \hline & * & * \\ \hline \end{array} \end{bmatrix}$$

Figura 3. Esquema de superposición de matrices

Una vez realizada la superposición se eliminan la última fila y columna para considerar que el sistema está fijo en el contacto del depósito con el basamento rocoso, quedando:

$$[M] = \begin{bmatrix} M_{311} & M_{312} & 0 \\ M_{321} & M_{322} + m_{211} & M_{212} \\ 0 & M_{221} & M_{222} + M_{111} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{311} & K_{312} & 0 \\ K_{321} & K_{322} + K_{211} & K_{212} \\ 0 & K_{221} & K_{222} + K_{111} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Una vez construidas las matrices se soluciona como un problema de vibración libre no amortiguada, variando la frecuencia angular hasta que se cumpla la siguiente ecuación:

$$\det|[K] - \omega^2[M]| = 0 \quad (17)$$

Resuelto el problema de valores y vectores propios, se puede calcular el período del sitio a partir de la frecuencia circular de vibración del primer modo.

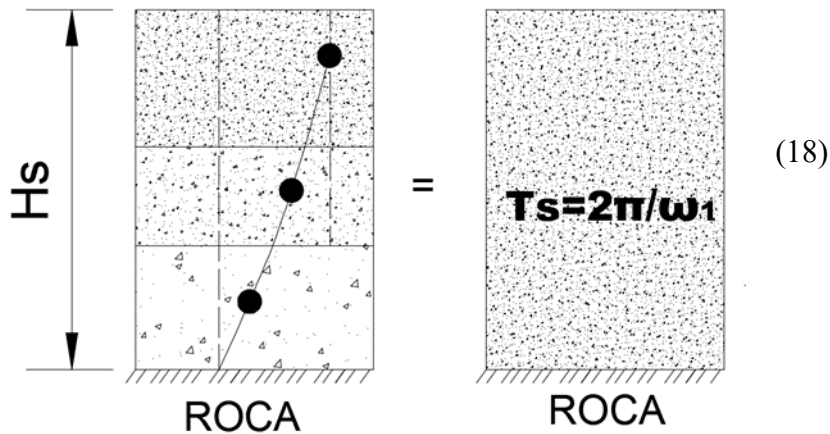


Figura 4. Sistema de n grados de libertad a sistema de un grado de libertad

4.1.3.2 Método de Rayleigh

El método de Rayleigh puede utilizarse para estimar la frecuencia de vibración natural más baja o fundamental de un sistema, se basa en el principio de la conservación de la energía.

Para usar este método se numerarán los estratos empezando desde el más superficial hasta el más profundo.

$$T_s = \frac{4}{\sqrt{g}} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \frac{H_i}{G_i} \right) \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (W_i^2 + W_i W_{i-1} + W_{i-1}^2) \right)} \quad (19)$$

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^i H_j / G_j}{\sum_{j=1}^n H_j / G_j} \quad (20)$$

Donde:

i número de estrato.

n total de estratos.

H_i Altura del estrato i .

G_i Modulo de cortante del estrato i .

W_i Término para cada estrato de acuerdo con ecuación 20.

4.1.3.3 Método del recíproco de las lentitudes

El método consiste en calcular la velocidad de propagación de onda de un estrato equivalente basándose en las velocidades de onda y altura correspondientes a cada estrato individual.

$$V_{si} = \sqrt{\frac{G}{\rho_{si}}} \quad (21)$$

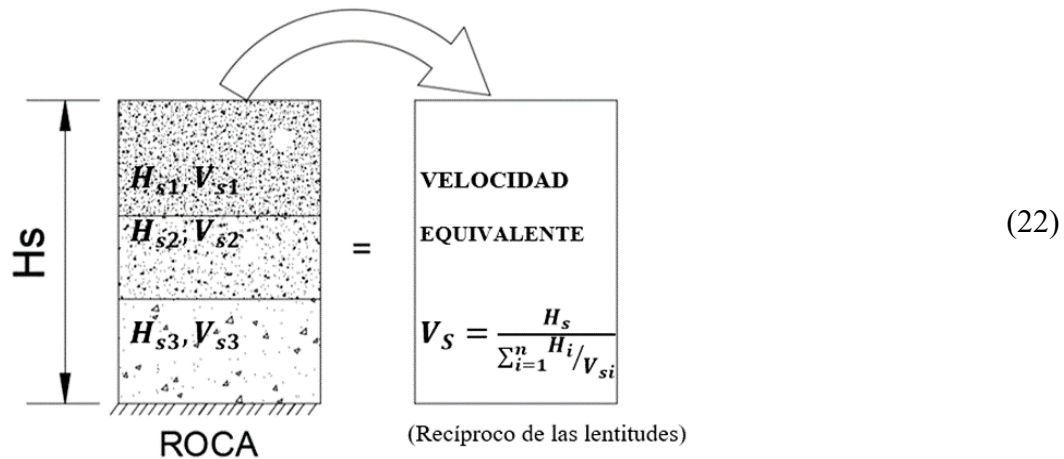


Figura 5. Propagación de ondas en n estratos.

Donde:

- V_{si} Velocidad de propagación de onda de cada estrato
- H_i Altura de cada estrato
- n Número de estratos
- H_s Altura total
- V_s Velocidad de propagación de onda para estrato equivalente

Una vez obtenida la velocidad de onda del estrato equivalente, es posible evaluar el período del sitio, con base en la teoría de propagación de ondas unidimensionales.

ROCA

Figura 6. Estrato equivalente, período para el primer modo

$$T_n = \frac{1}{(2n-1)} \frac{4H_s}{V_s} \quad (23)$$

$$\text{Para } n=1 \quad T_1 = \frac{4H_s}{V_s} \quad (24)$$

$$V_s = \frac{4H_s}{T_s} \quad (25)$$

- Donde:
- T_n Período para un modo n
- H_s profundidad de los depósitos firmes profundos en el sitio de interés
- V_s Velocidad de propagación de onda para estrato equivalente
- T_s Período del estrato equivalente

4.2 Propiedades de la estructura con base empotrada (sin ISE), utilizando el programa ETABS 2016 ®

4.2.1 Propiedades de los Materiales

4.2.1.1 Hormigón

4.2.1.1.1 Masa por unidad de volumen del hormigón

Según la región en la que se elabore el proyecto, la densidad del hormigón depende de la composición química, las densidades y granulometría de los agregados finos y gruesos que ahí se encuentren. Se puede estimar mientras tanto una densidad que oscile entre 2400 kg/m³.

En proyectos de importancia es necesario el diseño de hormigón para conocer sus propiedades mecánicas.

4.2.1.1.2 Módulo de elasticidad del hormigón

En los modelos elásticos de estructuras que se diseñan para acciones sísmicas, de acuerdo con los métodos de la NEC-SE-DS-2015, el módulo de elasticidad de hormigón E_c (GPa), será calculado para hormigones de densidad normal como:

$$E_c = 4.7 * \sqrt{f'_c} \quad (26)$$

Dónde:

- E_c Módulo de elasticidad para el hormigón (GPa)
- f'_c Resistencia a la compresión del hormigón (MPa)

Tabla 8. Valores calculados de E_c para algunos f'_c

f'_c (Mpa)	E_c (Mpa)
21	21538.10
24	23025.20
28	24870.06
30	25742.96
35	27805.58

4.2.1.1.3 Módulo de Poisson y Coeficiente de expansión térmica

Del mismo modo que la densidad del concreto, estos valores dependen del diseño de hormigón, en este trabajo no se profundiza la obtención de estos. Se usan valores estimados.

En la parte correspondiente se define el material llenando los campos como se muestra en la figura 7.

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box for concrete. The 'General Data' section includes 'Material Name' (35 Mpa), 'Material Type' (Concrete), 'Directional Symmetry Type' (Isotropic), 'Material Display Color' (a grey swatch), and 'Material Notes' (a button to 'Modify/Show Notes...'). The 'Material Weight and Mass' section has 'Specify Weight Density' selected, with 'Weight per Unit Volume' at 23.5631 kN/m³ and 'Mass per Unit Volume' at 2402.77 kg/m³. The 'Mechanical Property Data' section includes 'Modulus of Elasticity, E' (27805.58 MPa), 'Poisson's Ratio, U' (0.2), 'Coefficient of Thermal Expansion, A' (0.0000099 1/C), and 'Shear Modulus, G' (11585.66 MPa). The 'Design Property Data' section has a button 'Modify/Show Material Property Design Data...'. The 'Advanced Material Property Data' section has buttons for 'Nonlinear Material Data...' and 'Material Damping Properties...'.

Figura 7. Imagen de ETABS 2016, propiedades para concreto de 35 MPa

4.2.1.2 Acero

4.2.1.2.1 Límite de fluencia y otras propiedades

En cuanto a las propiedades del acero para análisis: peso, módulo de elasticidad, coeficiente térmico de expansión, se ingresan las proporcionadas por los distribuidores de varilla corrugada en Ecuador, cuyas especificaciones corresponden a aceros comerciales con límite de fluencia $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$

The screenshot shows two overlapping dialog boxes. The background is the 'Material Property Data' dialog box for steel, with 'Material Name' (fy 4200), 'Material Type' (Rebar), 'Directional Symmetry Type' (Uniaxial), 'Material Display Color' (a blue swatch), and 'Material Notes' (a button to 'Modify/Show Notes...'). The 'Material Weight and Mass' section has 'Specify Weight Density' selected, with 'Weight per Unit Volume' at 76.9729 kN/m³ and 'Mass per Unit Volume' at 7849.047 kg/m³. The 'Mechanical Property Data' section includes 'Modulus of Elasticity, E' (2038901.92 kgf/cm²) and 'Coefficient of Thermal Expansion, A' (0.0000117 1/C). The 'Design Property Data' section has a button 'Modify/Show Material Property Design Data...'. The foreground is the 'Material Property Design Data' dialog box, which includes 'Material Name' (fy 4200) and 'Material Type' (Rebar, Uniaxial). The 'Design Properties for Rebar Materials' section includes 'Minimum Yield Strength, Fy' (4200 kgf/cm²), 'Minimum Tensile Strength, Fu' (6327.63 kgf/cm²), 'Expected Yield Strength, Fye' (4640.26 kgf/cm²), and 'Expected Tensile Strength, Fue' (6960.39 kgf/cm²). The dialog box has 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 8. Imagen de ETABS 2016, propiedades acero de refuerzo $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$

4.2.2 Cálculo de masa de la estructura considerando la sobrecarga por acabados y mampostería.

El diseñador calculará los valores de sobrecarga de acuerdo con la arquitectura de cada proyecto, no se pretende profundizar en el tema de modelación de la estructura, para los casos a ser presentados estimaremos las siguientes cargas.

Carga Viva = 2 KN/m^2 (La mínima sobrecarga según NEC-SE-CG apéndice 4.2)

Carga muerta (sobrecarga, elementos no estructurales y acabados) = 3 KN/m^2 (Según NSR-10 Tabla B.3.4.3-1, valores mínimos alternativos de elementos no estructurales cuando no se efectúe un análisis más detallado)

Para obtener la masa equivalente se genera la tabla *Mass Summary by Group*

Tabla 9. *Mass Summary by Group*

TABLE: Mass Summary by Group					
Group	Self Mass	Self Weight	Mass X	Mass Y	Mass Z
	kg	kN	kg	kg	kg
All	5041921.96	0	6588973.97	6588973.97	0

$$\text{Masa} = (\text{Mass X} / 9810) [\text{t-s}^2/\text{m}] \quad (27)$$

4.2.3 Periodo fundamental y porcentajes de masa participante.

4.2.3.1 Cálculo aproximado del período fundamental de vibración aproximado T_a

Se puede definir el período de la edificación previamente con el siguiente cálculo:

Para estructuras de edificación, el valor de T puede determinarse de manera aproximada mediante la expresión:

$$T = C_t h_n^\alpha \quad (28)$$

Dónde:

C_t y α Coeficiente que depende del tipo de edificio

h_n Altura máxima de la edificación de n pisos, medida desde la base de la estructura, en metros.

La tabla 10 muestra los valores para determinar el período de vibración T

Tabla 10. *Valores de C_t y α*

Tipo de estructura	C_t	α
Estructuras de acero		
Sin arriostramientos	0.072	0.8

Con arriostramientos	0.073	0.75
Pórticos especiales de hormigón armado		
Sin muros estructurales ni diagonales rigidizadoras	0.055	0.9
Con muros estructurales o diagonales rigidizadoras y para otras estructuras basadas en muros estructurales y mampostería estructural	0.055	0.75

Nota: por el método 1, Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS,6.3.3, 2015)

4.2.3.2 Cálculo del período fundamental y frecuencia circular de vibración usando Etabs

a) Período fundamental

Para este punto el modelo debe estar elaborado con las secciones de elementos que generen un porcentaje de participación de masa alto en las direcciones X e Y según la norma, hay que verificar que el modelo no se encuentre acoplado o que el Modo 1 no sea el rotacional.

Se genera la tabla *Modal Participating Mass Ratios*, el periodo en el modo 1 es el período fundamental en la dirección correspondiente.

De esta manera se consigue un período fundamental para la dirección X y otro para la dirección Y; a diferencia del valor único calculado con la ecuación 28.

Tabla 11. Períodos y porcentaje de Participación modal²

TABLE: Modal Participating Mass Ratios														
Case	Mode	Period	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ	RX	RY	RZ	Sum RX	Sum RY	Sum RZ
		sec												
Modal	1	2.873	0.7683	0.0004	0	0.7683	0.0004	0	0.00004	0.2379	0.0009	0.00004	0.2379	0.0009
Modal	2	2.243	0.0002	0.7169	0	0.7684	0.7173	0	0.2938	0.0004	0.0008	0.2938	0.2383	0.0017
Modal	3	2.08	0.0024	0.0009	0	0.7708	0.7182	0	0.0003	0.0001	0.7528	0.2941	0.2384	0.7546
Modal	4	0.887	0.1136	0.0002	0	0.8844	0.7184	0	0.002	0.4718	0.0001	0.2961	0.7102	0.7546

b) Frecuencia circular de la estructura

A partir del período, se calcula:

$$\omega_e = \frac{2\pi}{T_e} \quad (29)$$

Donde:

T_e Período fundamental en el sentido de análisis

c) Porcentaje de masa participante y masa equivalente m_e

Los valores UX, UY y RZ para los diferentes modos de la tabla 11 señalan el porcentaje de masa participante, multiplicando el valor correspondiente al porcentaje de masa participante del modo 1 por la masa de la estructura tenemos la masa equivalente m_e .

² Los valores mostrados en la tabla son solo explicativos.

4.2.3.3 Rigidez equivalente de la estructura

Una vez calculado el período fundamental de la estructura se puede calcular su rigidez equivalente.

$$K_e = \frac{4 \cdot m_e \cdot \pi^2}{T_e^2} \quad (30)$$

Donde:

m_e Masa equivalente de la estructura

T_e Período fundamental en el sentido de análisis

4.2.3.4 Amortiguamiento

a) Amortiguamiento de la estructura

Se calcula como:

$$C_e = m_e \cdot \xi \cdot \omega_e \quad (31)$$

Donde:

m_e Masa de la estructura

ξ Factor de amortiguamiento crítico de la estructura.

ω_e Frecuencia circular de la estructura

4.3 Propiedades de la cimentación

La cimentación enlaza a la superestructura con el suelo, es la encargada de transmitir la excitación del suelo a la misma. A partir de las dimensiones según se muestra en las figuras 9 y 10 se determinan las siguientes propiedades:

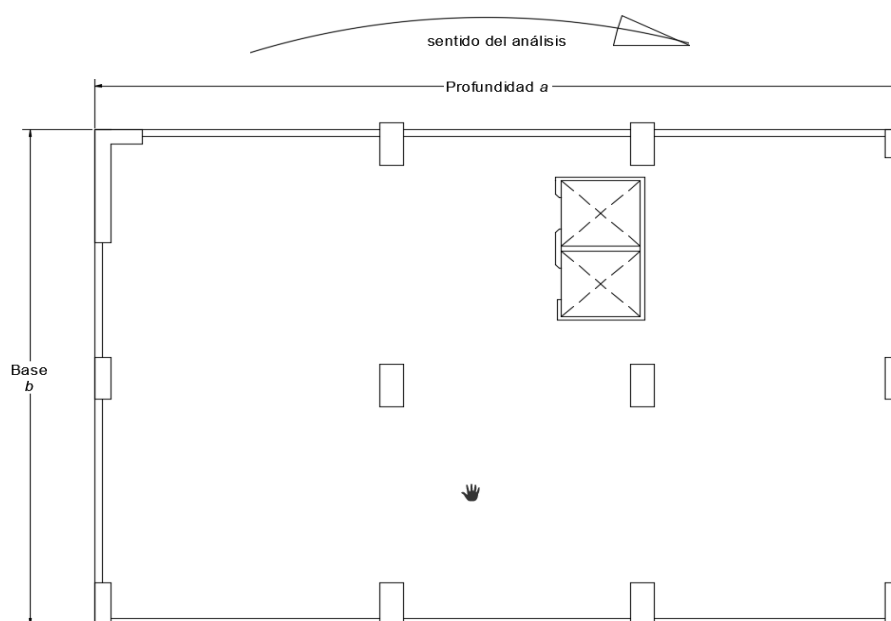


Figura 9. Vista en planta de cimentación tipo cajón

4.3.1 Profundidad y base

La profundidad a es la dimensión paralela al sentido en el que se realiza el análisis, en tanto que la base b es perpendicular a dicho sentido.

4.3.2 Desplante

El desplante D es la altura medida desde la superficie del terreno hasta el nivel de fundación.

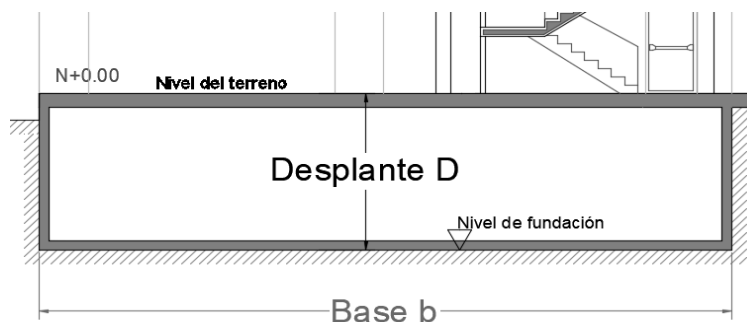


Figura 10. Desplante en cimentación tipo cajón

4.3.3 Radio horizontal

Es el radio con el cual se consigue una cimentación circular de área equivalente a la original.

$$R_h = \left(\frac{A}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (32)$$

$$A = a \times b \text{ (cajón de cimentación)} \quad (33)$$

4.3.4 Radio de cabeceo

Es el radio de la cimentación circular equivalente con el que se produce una inercia igual a la de la cimentación original.

$$R_c = \left(\frac{4I}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (34)$$

$$I = \frac{bxa^3}{12} \text{ (a sentido del análisis)} \quad (35)$$

4.4 Interacción suelo estructura

Los efectos de interacción se tendrán en cuenta sólo en el modo fundamental de vibración; la contribución de los modos superiores se determinará como se establece para estructuras sin interacción. La respuesta del sistema a la excitación con ISE se determina en

base a una variación de sus propiedades dinámicas como estructura empotrada, interactuando con las propiedades dinámicas del terreno enlazadas por el tipo de cimentación.

4.4.1 Valores Paramétricos

Las siguientes relaciones permiten identificar la importancia que los efectos ISE tendrán sobre determinada estructura, siendo relevantes las que consideran: sitio – cimentación; profundidad – cimentación y estructura – cimentación.

a) Relación de masas

Generalmente varía entre 0.1 y 0.3. Este parámetro no influye en la respuesta, por lo que se puede despreciar.

$$R_M = \frac{m_c}{m_e} \quad (36)$$

Donde:

m_c masa de la cimentación.

m_e masa equivalente de la estructura.

b) Relación de inercias

Habitualmente son menores que 0.1. Este parámetro tampoco influye en la respuesta, por lo que se puede despreciar.

$$R_I = \frac{J_c}{J_e} \quad (37)$$

Donde:

J_c inercia de la cimentación.

J_e inercia de la estructura.

c) Densidad relativa

Generalmente varía entre 0.1 y 0.2. Este parámetro tiene poca influencia en la respuesta.

$$D_R = \frac{\rho_e}{\rho_s} \quad (38)$$

Donde:

ρ_e densidad de la estructura.

ρ_s densidad del suelo.

d) Profundidad relativa

Los efectos de sitio en la interacción inercial son parcialmente función de este parámetro. Su variación puede estar entre 2 y 10.

$$P_R = \frac{H_s}{R_h} \quad (39)$$

Donde:

H_s profundidad de los depósitos firmes profundos en el sitio de interés

R_h radio equivalente horizontal de la cimentación. Ver ecuación 32

e) Profundidad de desplante

El alargamiento del período y el aumento del amortiguamiento son función decreciente de este parámetro. Su variación puede estar entre 0 y 0.5.

$$P_D = \frac{D}{R_h} \quad (40)$$

Donde:

D Profundidad de desplante de la cimentación.

R_h Radio horizontal equivalente. Ver ecuación 32.

f) Relación de esbeltez

Sus valores típicos varían entre 2 y 5. Su influencia en la respuesta es fundamental. (Botero,2004). El período es función creciente de este parámetro, mientras que el amortiguamiento es decreciente.

$$R_E = \frac{H_e}{R_h} \quad (41)$$

Donde:

H_e Altura equivalente de la estructura.

R_h Radio horizontal equivalente. Ver ecuación 32.

g) Rigidez relativa

En el caso de la rigidez relativa, se considera que es el parámetro que marca si es o no relevante realizar un análisis ISE, así lo indica el profesor Avilés (2003) y el reglamento mexicano de normas técnicas complementarias para diseño por sismo (2004); en donde se encuentra que cuando la rigidez relativa es mayor o igual a 0,4 el análisis de efectos ISE adquiere importancia práctica.

Por lo general varía entre 0 y 2. Su influencia en la respuesta es tal, que con ella se mide la importancia de la interacción inercial suelo estructura.

$$R_R = \frac{H_e/T_e}{H_s/T_s} \quad (42)$$

Donde:

H_e Altura equivalente de la estructura.

- T_e Periodo fundamental de la estructura.
 H_s Profundidad de los depósitos firmes profundos en el sitio de interés.
 T_s Periodo fundamental del suelo.

4.4.2 Cálculo del período y amortiguamiento de la estructura con efectos ISE por el método función de transferencia

A continuación, el método propuesto por (Avilés López, 2003), consta en el Reglamento mexicano de normas técnicas complementarias de diseño por sismo (2004).

4.4.2.1. Rigideces Estáticas

a) Rigidez estática horizontal

Es la rigidez horizontal correspondiente al sistema suelo - cimentación.

$$K_h^e = \frac{8GR_h}{2-\nu} \left[1 + \frac{R_h}{2H_s} \right] \left[1 + \frac{2D}{3R_h} \right] \left[1 + \frac{5D}{4H_s} \right] \quad (43)$$

Donde:

- G Módulo de cortante del estrato equivalente
 R_h Radio horizontal equivalente. Ver ecuación 32.
 ν Módulo de Poisson del estrato equivalente
 H_s Profundidad de los depósitos firmes profundos en el sitio de interés.
 D Profundidad del cajón de cimentación.

b) Rigidez estática de cabeceo

Se calcula de tal manera que la relación entre la rotación de la base y el movimiento de cuerpo rígido de la estructura sea proporcional.

$$K_c^e = \frac{8GR_c^3}{3(1-\nu)} \left[1 + \frac{R_c}{2H_s} \right] \left[1 + \frac{2D}{R_c} \right] \left[1 + \frac{0.71D}{H_s} \right] \quad (44)$$

Donde:

- G Módulo de cortante del estrato equivalente
 R_c Radio de cabeceo de cimentación circular con inercia equivalente
 ν Módulo de Poisson del estrato equivalente
 H_s Profundidad de los depósitos firmes profundos en el sitio de interés.
 D Profundidad del cajón de cimentación

c) Rigidez estática de acoplamiento

Representa el acoplamiento de los movimientos horizontal y de cabeceo de la estructura y de la cimentación.

$$K_{hc}^e = K_h^e R_h \left[\frac{2D}{5R_h} - 0.03 \right] \quad (45)$$

Donde:

- R_h Radio Horizontal de cimentación circular equivalente
 K_h^e Rigidez estática horizontal
 R_h Radio Horizontal de cimentación circular equivalente
 D Profundidad del cajón de cimentación

4.4.2.2 Factores de rigidez y amortiguamiento

a) Frecuencia adimensional del estrato de vibración lateral, a_s :

$$a_s = \frac{\pi R_h}{2H_s} \quad (46)$$

Donde:

- R_h Radio horizontal de cimentación circular equivalente
 H_s Profundidad de los depósitos firmes profundos en el sitio de interés.

b) Frecuencia adimensional del estrato de vibración vertical, a_p :

$$a_p = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)}} \cdot \frac{\pi R_c}{2H_s} \quad (47)$$

Donde:

- R_c Radio de cabeceo de cimentación circular con inercia equivalente
 H_s Profundidad de los depósitos firmes profundos en el sitio de interés.
 ν Módulo de Poisson del estrato equivalente

4.4.2.3 Parámetros variables

Se calculan los diferentes parámetros para diferentes valores de T_i (período de excitación); con esto se tabula para cada T_i sus parámetros y factores respectivos.

a) Cálculo de la frecuencia de excitación

$$\omega_i = \frac{2\pi}{T_i} \quad (48)$$

Donde:

- ω_i Es la frecuencia i correspondiente a cada período T_i
 T_i Período de excitación. Variable independiente para el cálculo de los parámetros

b) Cálculo de frecuencia adimensional horizontal a_{oh} y frecuencia adimensional de cabeceo a_{oc}

$$a_{oh} = \frac{\omega_i R_h}{V_s} \quad (49)$$

$$a_{oc} = \frac{\omega_i R_c}{V_s} \quad (50)$$

Donde:

ω_i Frecuencia i correspondiente a cada período T_i

R_h Radio horizontal de cimentación circular equivalente, ver ecuación

R_c Radio de cabeceo de cimentación circular con inercia equivalente

V_s Velocidad de onda del suelo del estrato equivalente

a) Relación a_{oh}/a_s y a_{oc}/a_p :

$$\frac{a_{oh}}{a_s} \quad (51)$$

$$\frac{a_{oc}}{a_p} \quad (52)$$

Donde:

a_{oh} Frecuencia adimensional horizontal, ver ecuación 49.

a_s Frecuencia adimensional del estrato de vibración lateral, ver ecuación 46.

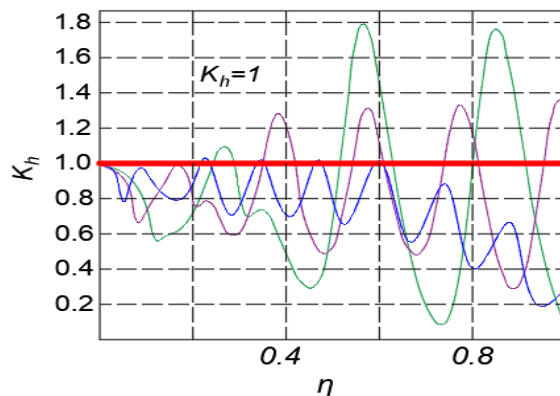
a_{oc} Frecuencia adimensional de cabeceo, ver ecuación 50.

a_p Frecuencia adimensional del estrato de vibración vertical, ver ecuación 47.

4.4.2.4 Factores adimensionales de rigidez (k_h , k_c)

Se calculan los factores que nos permiten determinar la rigidez dinámica y las constantes de amortiguamiento dinámico:

a) Rigidez horizontal



Coefficiente de rigidez para los modos de traslación horizontal para una cimentación superficial ($D/R=0$) en un estrato con $R_s/H=2$ (línea verde), 3 (morada) y 5 (azul).

$\eta = a_{oh}$

Figura 11. Rigidez horizontal

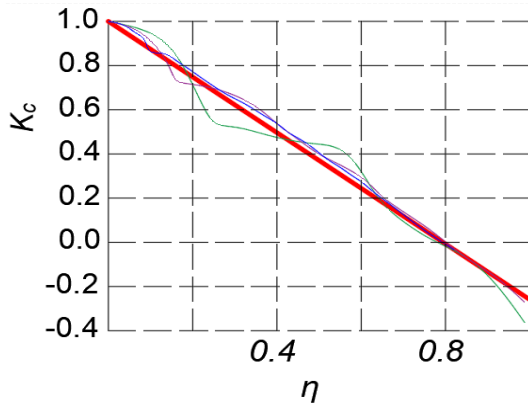
b) Rigidez de cabeceo

Dependiendo del valor de a_{oc} tenemos:

$$k_c = \begin{cases} 1 - 0.2a_{oc} & \text{si } a_{oc} \leq 2.5 \\ 0.5 & \text{si } a_{oc} > 2.5v \leq 1/3 \\ 1 - 0.2a_{oc} & \text{si } a_{oc} > 2.5v \geq 0.45 \end{cases} \quad (53)$$

$$(54)$$

$$(55)$$



Coeficiente de rigidez para los modos de cabeceo para una cimentación superficial ($D/R=0$) en un estrato con $R_s/H=2$ (línea verde), 3 (morada) y 5 (azul).

$$\eta = a_{oc}$$

Figura12. Rigidez de cabeceo

Donde:

a_{oc} Frecuencia adimensional de cabeceo, ver ecuación 50.

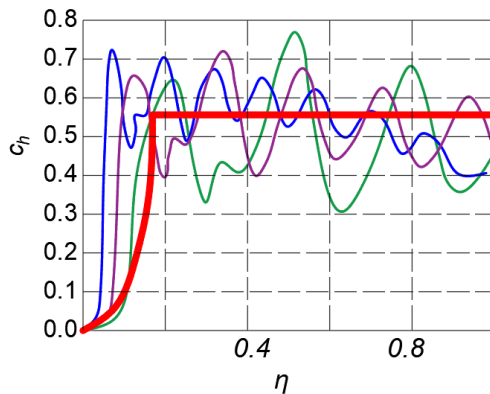
4.4.2.5 Factores de amortiguamiento.

a) Factores de amortiguamiento horizontal, C_h

Se muestran a continuación los factores de amortiguamiento según Gazetas G. (1991).

$$\text{Si } \frac{a_{oh}}{a_s} \leq 1 \quad C_h = \frac{0.65\xi_s(a_{oh}/a_s)}{1 - (1 - 2\xi_s)(a_{oh}/a_s)^2} \quad (56)$$

$$\text{Si } \frac{a_{oh}}{a_s} > 1 \quad c_h = 0.576 \quad (57)$$



Coeficiente de amortiguamiento para los modos de traslación horizontal para una cimentación superficial ($D/R=0$) en un estrato con $R_s/H=2$ (línea verde), 3 (morada) y 5 (azul).

$$\eta = a_{oh}$$

Figura13. Amortiguamiento horizontal

Donde:

ξ_s Factor de amortiguamiento crítico del suelo.

a_{oh} Frecuencia adimensional horizontal, ver ecuación 49.

a_s parámetro constante, ver ecuación 46.

b) Factores de amortiguamiento de cabeceo C_c

$$\text{Si } \frac{a_{oc}}{a_p} \leq 1 \quad C_c = \frac{0.5\xi_s(a_{oc}/a_p)}{1-(1-2\xi_s)(a_{oc}/a_p)^2} \quad (58)$$

$$\text{Si } \frac{a_{oc}}{a_p} > 1 \quad C_c = \frac{0.3a_{oc}^2}{1+a_{oc}^2} \quad (59)$$

Donde:

a_{oc} Frecuencia adimensional de cabeceo, ver ecuación 50.

a_p Parámetro constante, ver ecuación 47.

ξ_s Factor de amortiguamiento crítico del suelo.

4.4.2.6 Rigideces dinámicas.

a) Rigidez dinámica horizontal

$$K_h^d = K_h^e[K_h - 2\xi_s a_{oh} c_h] \quad (60)$$

Donde:

K_h^e Rigidez estática horizontal, ver ecuación 43.

K_h Factor adimensional de rigidez horizontal igual a 1.

ξ_s Factor de amortiguamiento crítico del suelo.

a_{oh} Frecuencia adimensional horizontal, ver ecuación 49.

c_h Factor adimensional de amortiguamiento horizontal, ver ecuaciones 56 o 57.

b) Rigidez dinámica de cabeceo.

$$K_c^d = K_c^e[K_c - 2\xi_s a_{oc} c_c] \quad (61)$$

Donde:

K_c^e Rigidez estática de cabeceo, ver ecuación 44.

K_c Factor adimensional de rigidez de cabeceo ver ecuación 53 o 54 o 55.

- ξ_s Factor de amortiguamiento crítico del suelo.
- a_{oc} Frecuencia adimensional de cabeceo, ver ecuación 50.
- c_c Factor de amortiguamiento de cabeceo, ver ecuaciones 58 o 59.

4.4.2.7 Constantes dinámicas de amortiguamiento.

a) Amortiguamiento dinámico horizontal

$$C_h^d = k_h^e \left[c_h + \frac{2\xi_s k_h}{a_{oh}} \right] \frac{R_h}{V_s} \quad (62)$$

Donde:

- K_h^e Rigidez estática horizontal, ver ecuación 43.
- c_h Factor adimensional de amortiguamiento horizontal, ver ecuaciones 56 o 57.
- ξ_s Factor de amortiguamiento crítico del suelo.
- k_h Factor adimensional de rigidez horizontal igual a 1.
- a_{oh} Frecuencia adimensional horizontal, ver ecuación 49.
- R_h Radio horizontal de cimentación equivalente, ver ecuación 32.
- V_s Velocidad de onda de estrato equivalente.

b) Amortiguamiento dinámico de cabeceo

$$C_c^d = k_c^e \left[c_c + \frac{2\xi_s k_c}{a_{oc}} \right] \frac{R_c}{V_s} \quad (63)$$

Donde:

- k_c^e Rigidez estática de cabeceo, ver ecuación 44.
- c_c Factor adimensional de amortiguamiento de cabeceo, ver ecuaciones 58 o 59.
- ξ_s Factor de amortiguamiento crítico del suelo.
- k_c Factor adimensional de rigidez de cabeceo. Ver ecuación 53 o 54 o 55.
- a_{oc} Frecuencia adimensional de cabeceo, ver ecuación 50.
- R_c Radio de cabeceo de cimentación equivalente, ver ecuación 34.
- V_s Velocidad de onda de estrato equivalente.

4.4.2.8 Dinámica de estructuras.

a) Ecuación matricial dinámica de estructuras

Despreciando la masa y la inercia de la cimentación, dado que, en los análisis paramétricos se demuestra que estos valores no influyen en la respuesta se caracteriza la siguiente ecuación: (Fernández y Avilés, 2008)

$$\begin{bmatrix} K_e & 0 & 0 \\ 0 & K_h^d & 0 \\ 0 & 0 & K_c^d \end{bmatrix} - \omega_i^2 \begin{bmatrix} M_e & M_e & M_e H_t \\ M_e & M_e & M_e H_t \\ M_e H_t & M_e H_t & M_e H_t^2 \end{bmatrix} + i\omega_i \begin{bmatrix} C_e & 0 & 0 \\ 0 & C_h^d & 0 \\ 0 & 0 & C_c^d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ H \\ \theta \end{Bmatrix} = \omega_i^2 X_g \begin{Bmatrix} M_e \\ M_e \\ M_e H_T \end{Bmatrix} \quad (64)$$

Donde:

K_e Rigidez equivalente de la estructura, constante, ver ecuación 30.

K_h^d Rigidez dinámica horizontal, variable, ver ecuación 60.

K_c^d Rigidez dinámica de cabeceo, ver ecuación 61.

ω_i Frecuencia circular de excitación.

M_e Masa equivalente de la estructura.

H_t Altura total, es la suma del desplante D más la altura equivalente H_e .

C_e Amortiguamiento de la estructura, ver ecuación 31.

C_h^d Constante de amortiguamiento dinámico horizontal, ver ecuación 62.

C_c^d Constante de amortiguamiento dinámico de cabeceo, ver ecuación 63.

U Deformación estructural

H Desplazamiento horizontal de cimentación

θ Rotación de cimentación

b) Solución de una matriz compleja

Se caracteriza la ecuación 64 de la forma:

$$[Z]\{X\} = \{F\} \quad (65)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} K_e & 0 & 0 \\ 0 & K_h^d & 0 \\ 0 & 0 & K_c^d \end{bmatrix} - \omega_i^2 \begin{bmatrix} M_e & M_e & M_e H_t \\ M_e & M_e & M_e H_t \\ M_e H_t & M_e H_t & M_e H_t^2 \end{bmatrix} + i\omega_i \begin{bmatrix} C_e & 0 & 0 \\ 0 & C_h^d & 0 \\ 0 & 0 & C_c^d \end{bmatrix}}_{\mathbf{Z}} \underbrace{\begin{Bmatrix} U \\ H \\ \theta \end{Bmatrix}}_{\mathbf{X}} = \omega_i^2 X_g \underbrace{\begin{Bmatrix} M_e \\ M_e \\ M_e H_T \end{Bmatrix}}_{\mathbf{F}}$$

Para obtener el vector de desplazamientos $\{X\} = \{U, H, \theta\}$ se pre-multiplica $[Z]$ por su inversa:

$$[Z]\{X\} = \{F\} \quad (66)$$

$$[Z]^{-1}[Z]\{X\} = [Z]^{-1}\{F\} \quad (67)$$

$$[I]\{X\} = [Z]^{-1}\{F\} \quad (68)$$

$$\{X\} = [Z]^{-1}\{F\} \quad (69)$$

Para obtener el vector de desplazamientos $\{X\}$, se requiere entonces obtener la inversa³ de la matriz compleja $[Z]$, por lo cual se recurre al siguiente procedimiento:

³ Por definición de inversa de una matriz se tiene que, la matriz inversa de “Z” es la única matriz que al multiplicarla por ella obtenemos la matriz identidad del orden correspondiente.

Entonces:

$$[I] = [Z]^{-1}[Z] \quad (70)$$

$[Z]$ y $[Z]^{-1}$ se pueden escribir de la siguiente forma:

$$[Z] = [A] + i[B] \quad (71)$$

$$[Z]^{-1} = [C] + i[D] \quad (72)$$

Cabe destacar que la matriz C en la ecuación 72 no es la matriz de amortiguamiento, sino que se usa por cuestión de nomenclatura la secuencia A, B, C, D.

Desarrollado la identidad 70 se tiene:

$$[I] = [C] + i[D] \cdot [A] + i[B] \quad (73)$$

$$[I] = [C][A] - [D][B] + i[C][B] + i[D][A] \quad (74)$$

Por definición, la matriz de identidad $[I]$ solo tiene parte real, entonces:

$$[I] = [C][A] - [D][B] \quad (75)$$

$$[0] = [C][B] + [D][A] \quad (76)$$

Resolviendo la ecuación 76 se obtiene $[D]$:

$$[D][A] = -[C][B] \quad (77)$$

$$[D][A][A]^{-1} = -[C][B][A]^{-1} \quad (78)$$

$$[D] = -[C][B][A]^{-1} \quad (79)$$

Sustituyendo $[D]$ en la ecuación 75 se tiene:

$$[I] = [C][A] + [C][B][A]^{-1}[B] \quad (80)$$

$$[I] = [C] \cdot [A] + [B][A]^{-1}[B] \quad (81)$$

$$[C] = [A] + [B][A]^{-1}[B]^{-1} \quad (82)$$

Teniendo definidas A y B en la ecuación 71 podemos calcular la matriz C:

$$\left[\begin{array}{ccc} K_e & 0 & 0 \\ 0 & K_h & 0 \\ 0 & 0 & K_c \end{array} \right] - \omega_i^2 \underbrace{\left[\begin{array}{ccc} M_e & M_e & M_e H_t \\ M_e & M_e & M_e H_t \\ M_e H_t & M_e H_t & M_e H_T^2 \end{array} \right]}_A + i\omega_i \underbrace{\left[\begin{array}{ccc} C_e & 0 & 0 \\ 0 & C_h & 0 \\ 0 & 0 & C_c \end{array} \right]}_B \begin{Bmatrix} U \\ H \\ \theta \end{Bmatrix} = \omega_i^2 X_g \begin{Bmatrix} M_e \\ M_e \\ M_e H_T \end{Bmatrix}$$

Finalmente se obtiene D reemplazando las matrices A, B y C en la ecuación 79.

Para obtener el vector de desplazamientos $\{X\}$ volvemos a la ecuación 69 y reemplazamos $[Z]^{-1}$ de la ecuación 72 teniendo así una ecuación con un término real y uno imaginario.

$$\{X\} = [C] + i[D]\{F\} \quad (83)$$

$$\{X\} = [C]\{F\} = \begin{Bmatrix} U_R \\ H_R \\ \theta_R \end{Bmatrix} \quad \text{Término real} \quad (84)$$

$$\{X\} = [D]\{F\} = \begin{Bmatrix} U_I \\ H_I \\ \theta_I \end{Bmatrix} \quad \text{Término imaginario} \quad (85)$$

Expandiendo el vector X tenemos una parte real

$$[C] \begin{Bmatrix} M_e \\ M_e \\ M_e H_T \end{Bmatrix} \omega_i^2 X_g = \begin{Bmatrix} U_R \\ H_R \\ \theta_R \end{Bmatrix} \quad (86)$$

Y una parte imaginaria

$$[D] \begin{Bmatrix} M_e \\ M_e \\ M_e H_T \end{Bmatrix} \omega_i^2 X_g = \begin{Bmatrix} U_I \\ H_I \\ \theta_I \end{Bmatrix} \quad (87)$$

Finalmente, obtenemos un U_R y U_I para cada período iterado T_i

Para cada relación T_i/T_e nos genera un valor $\frac{\omega_e^2 \cdot U}{\ddot{X}_g}$ según la siguiente ecuación:

$$\frac{\ddot{U}}{\ddot{X}_s} = \frac{\omega_e^2 \cdot U}{\ddot{X}_g} = \sqrt{U_R^2 + U_I^2} \cdot \omega_e^2 \quad (88)$$

El valor máximo de la gráfica nos permite encontrar la relación T_i/T_e en donde se halla el período de interacción suelo-estructura T_{ise} .

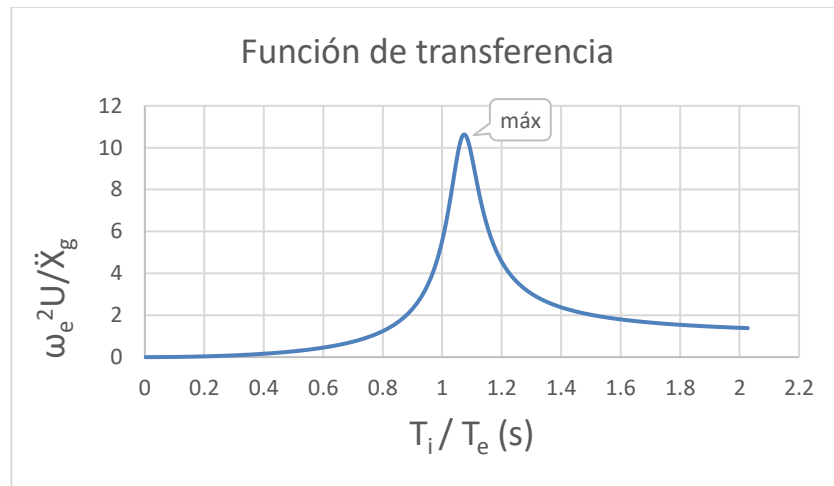


Figura 14. Función de transferencia.

Los valores de la curva corresponden a la relación $\frac{T_i}{T_e}$ vs. $\frac{\ddot{U}}{\ddot{X}_s}$

En donde se encuentra $\frac{\ddot{U}}{\ddot{X}_s}$ máximo podemos calcular el T_{ise} como:

$$T_{ise} = \left(\frac{T_i}{T_e} \right)_{\text{máx}} \cdot T_e \quad (89)$$

Para encontrar el amortiguamiento se calcula con el valor máximo de la función:

$$\xi_{ise} = \frac{1}{2(W_e^2 \cdot U / \ddot{X}_g)_{\text{máx}}} \quad (90)$$

5. CASO PRÁCTICO.

5.1 EDIFICIO A

5.1.1 Descripción, geometría y ubicación del proyecto

El proyecto “EDIFICIO A” consiste en el análisis y diseño de un edificio para huéspedes, consta de dos torres, A y B de igual arquitectura, comprenden 22 pisos y un subsuelo que se formará del diseño de la cimentación tipo cajón.

Está ubicado en Ecuador, en la provincia de Esmeraldas, Cantón Atacames, en la Parroquia Tonsupa.

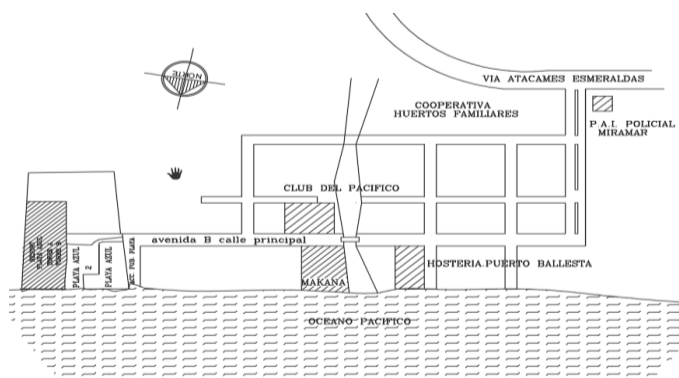


Figura 15. Mapa de la ubicación del Resort Playa Azul.

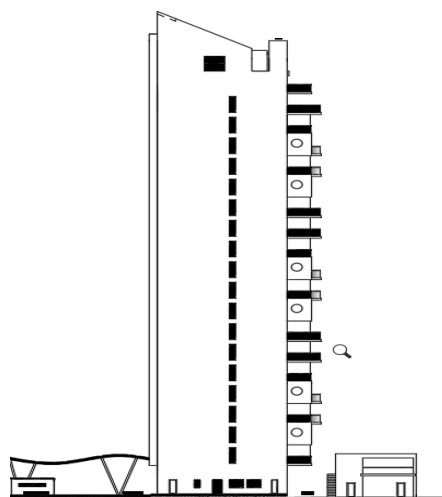


Figura 16. Arquitectura de Torre, vista lateral.

Tabla 12. Distribución de plantas en altura edificio A

Distribución de plantas en altura		
Piso	Altura de entrepiso (m)	Planta Tipo
1	4.50	A
2 al 19	3.06	A
20 al 22	3.06	B
TOTAL	68.76	

Tabla 13. Secciones de columnas y muros edificio A

Secciones de columnas y muros	
Eje	Sección (cm)
1A, 2A, 1D, 2D	40 x 120
1B, 2B, 3B, 1C, 2C, 3C	60 x 120
3D	40 x 80
3A	Muro L 100 x 300 x 40
Ascensor T intermedia	Muro T 110x200x150
Ascensor muros externos	Muro C 200x 395x100

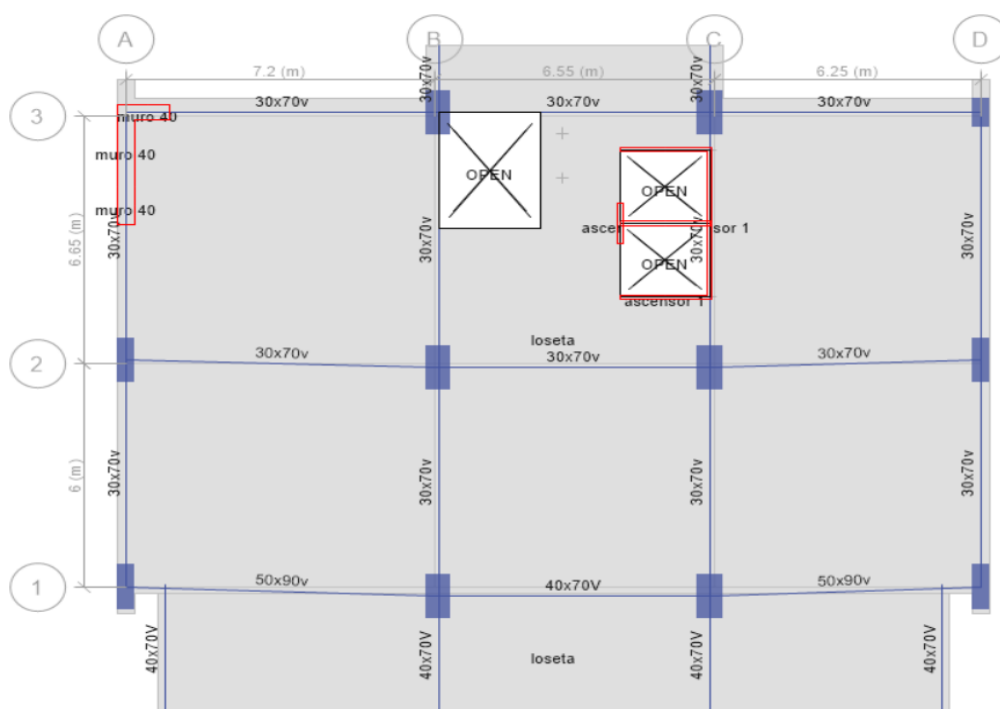


Figura 17. Planta tipo A

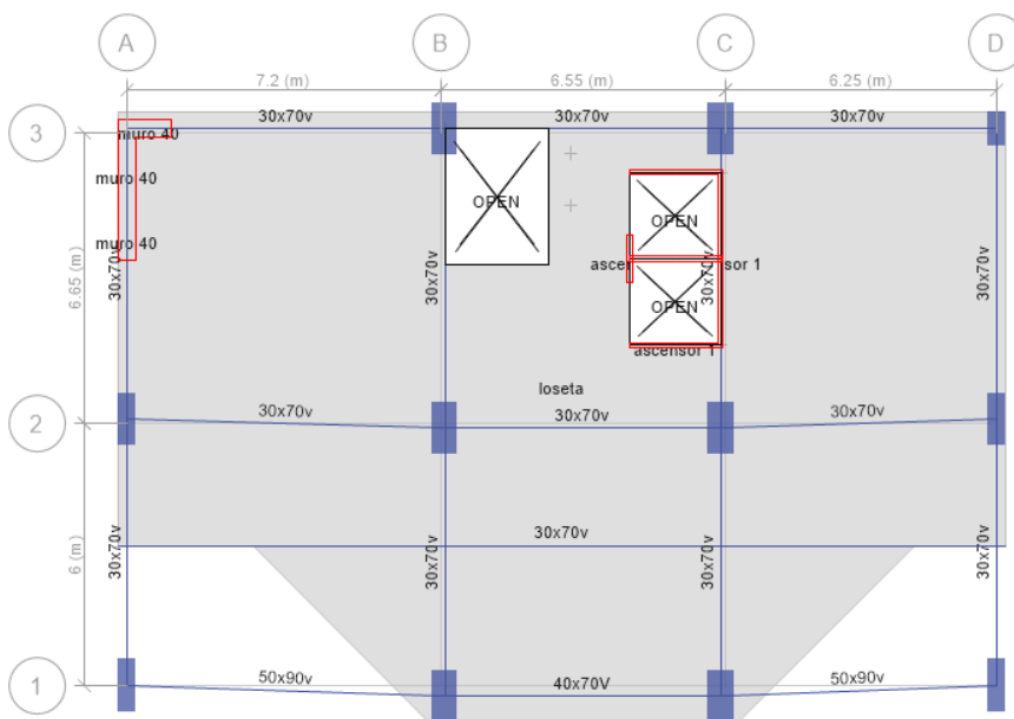


Figura 18. Planta tipo B

El edificio se considera como una super estructura y cimentación de hormigón armado, con losas bidireccionales apoyadas sobre vigas, cimentación tipo cajón y elementos verticales del tipo columnas y muros.

5.1.2 Cálculo de las propiedades del suelo edificio A

5.1.2.1 Ensayo SPT en terreno a implantar edificio A

Los resultados de SPT mostrados en la tabla 14, corresponden al estudio de suelos realizados en el sitio de implantación del proyecto. El punto p-33 se encuentra situado por debajo de la implantación de la torre en estudio.

La información con la que se cuenta tiene un estudio hasta los 10 mts de profundidad.

Tabla 14. Ensayo de penetración estándar (SPT).

		Tonsupa p-33	Tonsupa p-34
#	Profundidad	Nspt campo	Nspt campo
0	0.45	8	8
1	1.45	17	11
2	2.45	16	16
3	3.45	21	20
4	4.45	24	21
5	5.45	22	27
6	6.45	23	30
7	7.45	30	31
8	8.45	28	27
9	9.45	25	31
10	10	29	36

5.1.2.2 Cálculo de Vs y G a partir de N spt

La tabla 14 se puede reducir a 5 estratos, asignando a cada uno el promedio de dos sondeos que se ubiquen dentro de los intervalos de profundidad planteados en la tabla 15.

Utilizando las ecuaciones 11 y 12 se calculan los valores de velocidad de propagación de onda y promediamos estos resultados para tener un solo valor correspondiente a cada intervalo de profundidad.

Los valores de peso específico se encuentran en la tabla 6 considerando que no hay nivel freático y se promedió el valor mínimo con el máximo para un suelo de clasificación CH. Finalmente se divide en tres estratos para resumir el perfil de suelo del sitio de implantación.

Se puede correlacionar también el N(spt) con la propiedad G del suelo según lo ha propuesto Yorhito Ohsaki y Ryoji Iwasaki (1973)

$$G=1281N^{0.78} \quad (91)$$

Donde:

G Módulo de Cortante del suelo

N Número de golpes considerando el 67% de la energía teórica máxima.

Tabla 15. Valores de V_s y G para P-33

Tonsupa P-33

Profundidad (m)		SUCS	SPT	$V_s^{(4)}$ (m/s)	$V_s^{(5)}$ (m/s)	V_s Prom (m/s)	$G^{(6)}$ (ton/m ²)	V_s prom (m/s)	V_s prom (m/s)	γ^7 (KN/m ³)	γ (ton/m ³)
0	2	CH	13	174.90	183.79	179.35	6403.31	174.90	184	15.00	1.5
2	4	CH	19	199.06	207.54	203.30	8693.78	206.47	215	15.00	1.5
4	6	CH	23	213.89	222.03	217.96	10302.97				
6	8	CH	27	224.12	232.00	228.06	11506.59	225.27	233	15.00	1.5
8	10	CH	27	226.42	234.24	230.33	11787.86				

Tabla 16. Valores de V_s y G para P-34

Tonsupa P-34

Profundidad (m)		SUCS	SPT	V_s (m/s)	V_s (m/s)	V_s Prom (m/s)	G (ton/m ²)	V_s prom (m/s)	V_s prom (m/s)	γ (KN/m ³)	γ (ton/m ³)
0	2	CH	10	159.76	168.80	164.28	5169.39	159.76	168.80	15.00	1.5
2	4	CH	18	197.27	205.79	201.53	8509.95	207.09	215.38	15.00	1.5
4	6	CH	24	216.91	224.98	220.95	10650.73				
6	8	CH	31	234.76	242.33	238.55	12840.11	235.81	243.35	15.00	1.5
8	10	CH	31	236.86	244.37	240.61	13112.93				

Tenemos así la estratificación de P-33 con relación a la tabla 15:

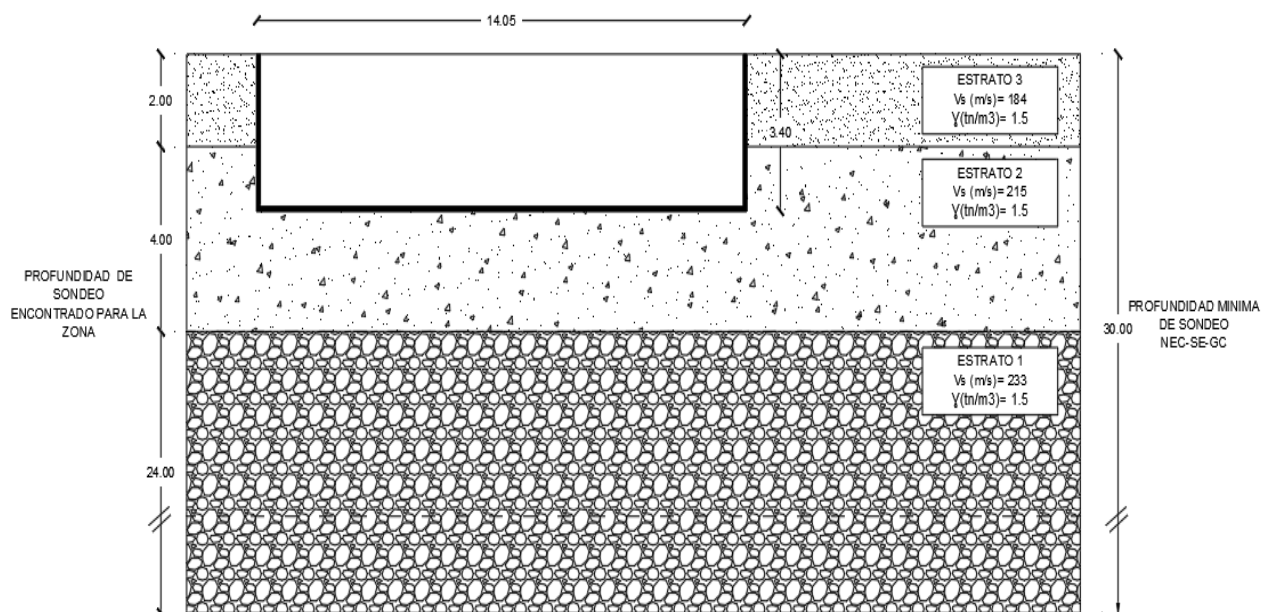


Figura 19. Perfil del suelo según los sondeos P-33.

⁴ Velocidad de propagación de ondas de corte Imai y Yoshimura (1990)

⁵ Velocidad de propagación de ondas de corte (Ohba y Toriumi, 1970).

⁶ Módulo de cortante (Yorhito Ohsaki y Ryoji Iwasaki; 1973)

⁷ Tabla 6 pesos específicos típicos

El estudio señala que el estrato 1 continúa hasta los 30 m. Siendo así, el estrato equivalente sería rígido debido a la ponderación que se realiza y que aproximaría el valor de cortante de suelo y velocidad de onda al del estrato de espesor más grande.

5.1.2.3 Cálculo del período para estrato equivalente de edificio A

a) Aplicación del método de las formas modales.

Se calcula ρ_s dividiendo γ_s por la gravedad y G mediante la ecuación 1

Tabla 17. Valores de G a partir de V_s en el método de las formas modales.

G a partir de V_s				
Estrato	V_s (m/s)	γ_s (t/m ³)	ρ_s (t.s ² /m ⁴)	G (t/m ²)
1	233	1.5	0.15	8309
2	215	1.5	0.15	7075
3	184	1.5	0.15	5182

Aplicando las ecuaciones 13 y 14 se construyen las matrices de masa y rigidez correspondientes a cada estrato.

Tabla 18. Matrices de masa y rigidez por estrato

Estrato1			
G (t/m ²)	8309	[m1]	1.22 0.61
γ (t/m ³)	1.5		0.61 1.22
H (m)	24	[k1]	346.23 -346.23
Estrato2			-346.23 346.23
G (t/m ²)	7075	[m2]	0.20 0.10
γ (t/m ³)	1.5		0.10 0.20
H (m)	4	[k2]	1768.81 -1768.81
Estrato3			-1768.81 1768.81
G (t/m ²)	5182	[m3]	0.10 0.05
γ (t/m ³)	1.5		0.05 0.10
H (m)	2	[k3]	2591.02 -2591.02
			-2591.02 2591.02

Se ensambla la matriz de masa y rigidez total de acuerdo con las ecuaciones 15 y 16 y se eliminan la última fila y columna para considerar que el depósito está fijo en el contacto con el basamento rocoso.

Tabla 19. Matriz de masa del sistema

[M]	0.10	0.05	0	0
	0.05	0.30	0.10	0.00
	0	0.10	1.42	0.61
	0	0	0.61	1.22

Tabla 20. Matriz de rigidez del sistema

[K]	2591.02	-2591.02	0	0.00
	-2591.02	4359.83	-1768.81	0.00
	0	-1768.81	2115.04	-346.23
	0	0	-20	20.00

Se varía la frecuencia angular hasta conseguir que el determinante según la ecuación 17 sea 0, esta frecuencia es la que corresponde a la del estrato equivalente, el período se calcula con la ecuación 18.

Tabla 21. Cálculo del período del estrato equivalente (edificio A)

[[k]-ω^2[m]]	2574.812	-2599.124	0.000
	-2599.124	4311.210	-1785.022
	0.000	-1785.022	1888.131
ω(rad/s)	12.61		
T_s(s)	0.50		
det(k-ω^2.m)	-2.1098E-06		

b) Aplicación del método de Rayleigh

Se han numerado los estratos del 1 al 3 siendo $n=3$ y para cada estrato i se tiene su relación H_i/G_i .

Mediante la ecuación 20 se obtiene W_i para cada estrato

La columna $\Upsilon_i \cdot H_i \cdot W_i$ corresponde a los valores para el segundo paréntesis de la ecuación 19.

Tabla 22. Método de Rayleigh

Estrato1	
G(t/m2)	8309
Y(t/m3)	1.5
H(m)	24
Estrato2	
G(t/m2)	7075
Y(t/m3)	1.5
H(m)	4
Estrato3	
G(t/m2)	5182
Y(t/m3)	1.5
H(m)	2

Estrato	H _i /G _i	W _i	Y _i *H _i *W#
1	0.003	0.752	20.37
2	0.001	0.899	12.30
3	0.000	1.000	8.13
	Σ	2.651	40.80
Ts(s)	0.51		

c) Aplicación del método del recíproco de las lentitudes.

Aplicando lo señalado en el numeral 4.1.3.3

Tabla 23. Valores de G y V_s en el método del recíproco de las lentitudes.

Estrato1	
G(t/m ²)	8309
Y(t/m ³)	1.5
H(m)	24
Estrato2	
G(t/m ²)	7075
Y(t/m ³)	1.5
H(m)	4
Estrato3	
G(t/m ²)	5182
Y(t/m ³)	1.5
H(m)	2

Estrato	ρ (t.s ² /m ⁴)	Vsi (m/s)	Vs(m/s)	Gs(t/m2)
1	0.153	233.00	226.45	7841.04
2	0.153	215.00		
3	0.153	184.00		
Hs (m)	30.00			
Ts(s)	0.53			

Los valores de período obtenidos son 0.50, 0.51 y 0.53 segundos con los diferentes métodos, tomaremos de aquí en adelante el valor del recíproco de las lentitudes porque es el más alto y representaría el período de un estrato equivalente menos rígido con relación a los otros valores, aunque como vemos la diferencia es mínima.

5.1.3 Cálculo de las propiedades de la estructura con base empotrada del edificio A

5.1.3.1 Modelación del edificio

Se modelan elementos frame para columnas y vigas de las secciones que se han definido en el numeral 5.1.1, elementos shell para muros y las losas se han modelado como tipo membrana para un sistema constructivo de tipo losa bidireccional, asignando las propiedades mostradas en la figura 20.

Figura 20. Propiedades asignadas para losa de edificio A

Los materiales se definen según se muestra en las figuras 7 y 8 para un hormigón de $f'_c=35$ Mpa y acero con $f_y= 4200$ kg/cm²

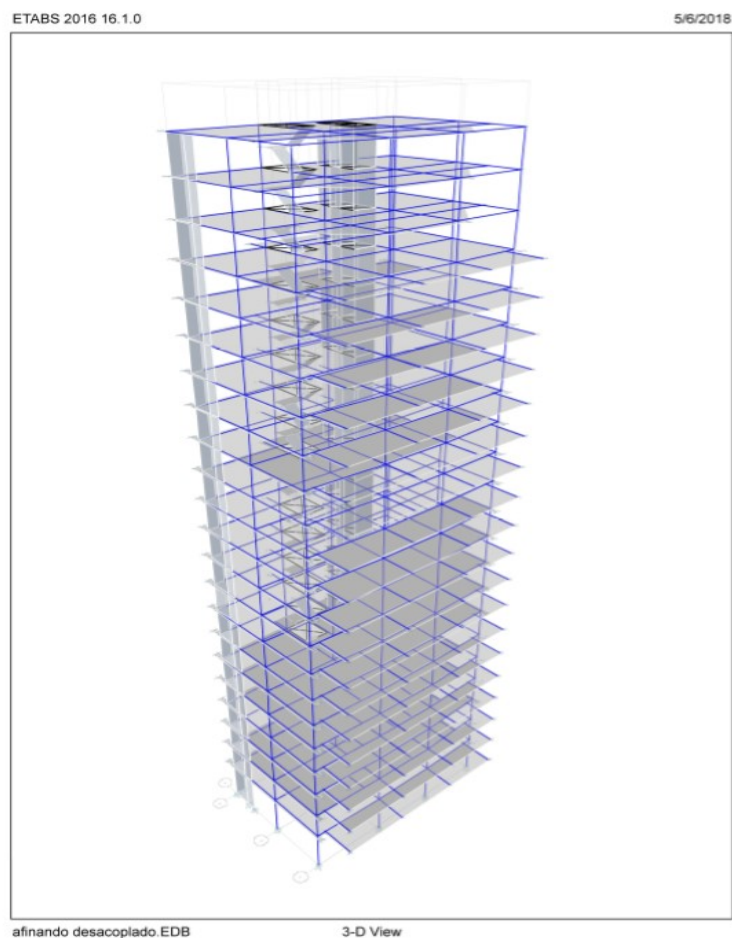


Figura 21. Modelación del edificio A en ETABS 2016.

5.1.3.2 Periodo fundamental y porcentajes de masa participante.

a) Cálculo aproximado del período fundamental de vibración aproximado T_e

Se puede definir el período de la edificación aproximado con el siguiente cálculo:

$$T = C_t h_n^\alpha \quad (28)$$

Tabla 24. Cálculo del período aproximado de edificio A

$T_e=$	2.477	s	Período equivalente NEC-SE-DS-2015 6.3.3.a
$C_t=$	0.055		Coeficiente que depende del tipo de edificio
$h_n=$	68.76	m	Altura máxima de la edificación de n pisos, medida desde la base de la estructura, en metros.
$\alpha=$	0.9		Coeficiente que depende del tipo de edificio

b) Período fundamental de vibración aproximado T_e generado del modelo en ETABS.

Una vez terminado el modelo, se obtienen los resultados y se genera la tabla 25, el modo 1 señala el período fundamental y la dirección correspondiente.

Tabla 25. Períodos y porcentaje de Participación modal

TABLE: Modal Participating Mass Ratios														
Case	Mode	Period	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ	RX	RY	RZ	Sum RX	Sum RY	Sum RZ
		sec												
Modal	1	2.873	0.7683	0.0004	0	0.7683	0.0004	0	0.00004	0.2379	0.0009	0.00004	0.2379	0.0009
Modal	2	2.243	0.0002	0.7169	0	0.7684	0.7173	0	0.2938	0.0004	0.0008	0.2938	0.2383	0.0017
Modal	3	2.08	0.0024	0.0009	0	0.7708	0.7182	0	0.0003	0.0001	0.7528	0.2941	0.2384	0.7546
Modal	4	0.887	0.1136	0.0002	0	0.8844	0.7184	0	0.002	0.4718	0.0001	0.2961	0.7102	0.7546
Modal	5	0.623	0.0001	0.0307	0	0.8846	0.7491	0	0.0765	0.0007	0.1006	0.3726	0.7109	0.8553
Modal	6	0.612	0.0005	0.1245	0	0.885	0.8736	0	0.3112	0.0006	0.0188	0.6837	0.7115	0.8741
Modal	7	0.475	0.0417	0.0001	0	0.9267	0.8737	0	0.0001	0.0711	0.0001	0.6838	0.7826	0.8742
Modal	8	0.322	0.0027	0.0035	0	0.9294	0.8773	0	0.0079	0.0109	0.0368	0.6917	0.7935	0.9109
Modal	9	0.306	0.0189	0.0043	0	0.9483	0.8815	0	0.01	0.0612	0.0045	0.7017	0.8547	0.9154
Modal	10	0.293	0.0017	0.0438	0	0.95	0.9253	0	0.0863	0.0041	0.0062	0.788	0.8588	0.9216
Modal	11	0.22	0.0122	0.00002	0	0.9622	0.9253	0	0.0002	0.0293	0.0025	0.7881	0.8881	0.9241
Modal	12	0.202	0.0016	0.0071	0	0.9637	0.9324	0	0.0213	0.0037	0.0156	0.8095	0.8918	0.9396

5.1.3.3 Cálculo de masa equivalente considerando la sobrecarga por acabados y mampostería.

Se aplicaron cargas distribuidas: muertas de 3KN/m^2 y vivas de 2KN/m^2 , según lo expuesto en la metodología, se genera la tabla mostrada a continuación:

Tabla 26. Masa equivalente

TABLE: Mass Summary by Group					
Group	Self Mass	Self Weight	Mass X	Mass Y	Mass Z
	kg	kN	kg	kg	kg
All	5041921.96	0	6588973.97	6588973.97	0

Fuente: Modelo Edificación A

$$Masa (m) = (Mass X / 9810) [t \cdot s^2/m] \quad (27)$$

$$m = 671.659 \text{ t} \cdot s^2/m$$

$$m_e = 76.83\% m = 516.036 \text{ t} \cdot s^2/m$$

5.1.3.4 Resultados de las propiedades de la estructura con base empotrada edificio A

Se utilizará los resultados calculados por ETABS® como parte de las propiedades de la estructura con base empotrada, el cálculo del período de manera aproximada señala un rango en el cual debe estar comprendido el período fundamental de un modelo refinado, el cual considera valores de masa y rigidez más rigurosamente calculados.

Al usar la ecuación 28 planteada por la norma para el cálculo del período por su simplicidad no se considera la configuración que tienen los 3 últimos pisos del edificio en estudio, la distribución y secciones de columnas y muros, por lo tanto, se empleará el período calculado en Etabs®.

Tabla 27. Resultados de las propiedades de la estructura

% masa participante=	76.83%		Porcentaje de participación de la masa en el modo 1
m_e =	516.036	t-s2/m	Masa equivalente
T_e =	2.873	s	Periodo según Etabs ®
T_e =	2.477	s	Período equivalente NEC-SE-DS-2015 6.3.3.a $T = C_t h_n^\alpha$
C_t =	0.055		Coeficiente que depende del tipo de edificio
h_n =	68.76	m	Altura máxima de la edificación de n pisos, medida desde la base de la estructura, en metros.
α =	0.9		Coeficiente que depende del tipo de edificio
H =	68.76	m	Altura del edificio
H_e =	51.57	m	Altura equivalente, 75% de la altura total del edificio (NSR-10, Pte. A-84)
K_e =	2468.130	(t/m)	Rigidez equivalente $K_e = \frac{4 \cdot m_e \cdot \pi^2}{T_e^2}$
$\xi\%$ =	5.00%		Fracción de amortiguamiento de la estructura (NEC-SE-DS-2015) (NSR-10, A.2.6.1, 2010)
ω_e =	2.187	(rad/s)	Frecuencia circular $\omega_e = \frac{2\pi}{T_e}$
C_e =	112.856	(t-s/m)	Amortiguamiento de la estructura $C_e = m_e \cdot \xi \cdot \omega_e$
H_t =	54.97	m	Altura total $H_T = H_e + D$
D =	3.4	m	Desplante

5.1.4 Propiedades de la cimentación

La cimentación del edificio A es de tipo cajón, el diseño de la cimentación no es tema de estudio, las dimensiones una vez realizado el diseño se muestran a continuación:

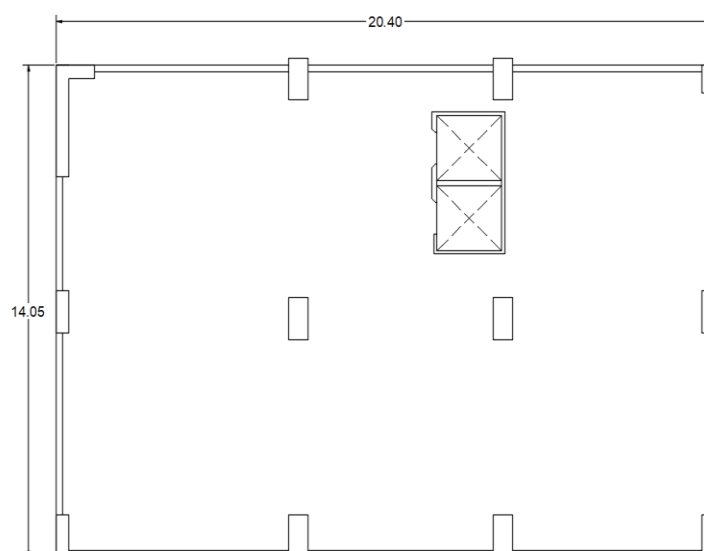


Figura 22. Planta de cimentación

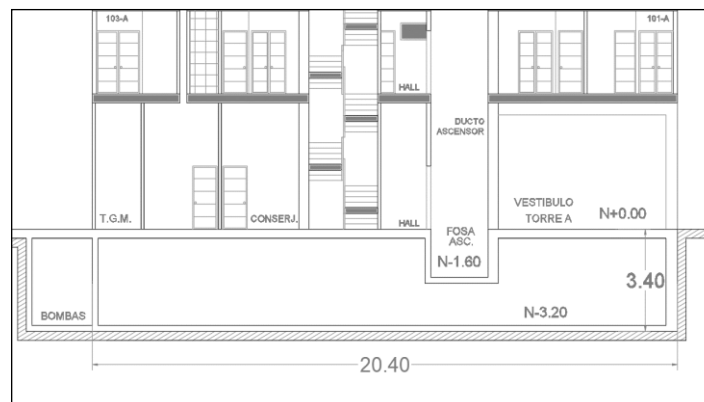


Figura 23. Cimentación sentido X-X

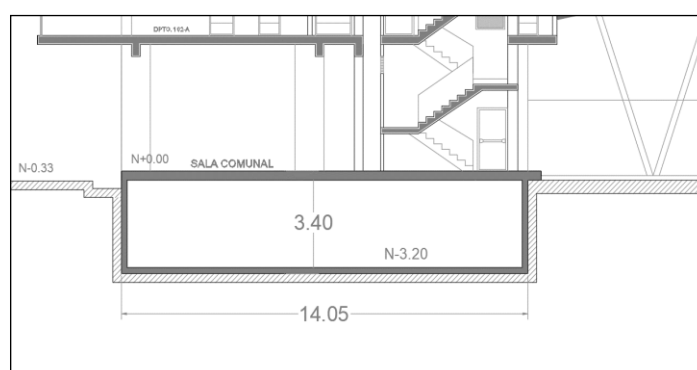


Figura 24. Cimentación sentido Y-Y

a) Radio horizontal R_h y Radio de cabeceo R_c

Para el problema en estudio se calculó en base a las ecuaciones 32, 33, 34 y 35:

Tabla 28. Resumen de parámetros de la fundación

Parámetros de la fundación Sentido X-X	
Base(m)	20.40
Profundidad(m)	14.05
Desplante D(m)	3.40
Radio horizontal R_h(m)	9.55
Radio de cabeceo R_c(m)	8.80
Para el sentido Y-Y	
Base(m)	14.05
Profundidad(m)	20.4
Desplante D(m)	3.40
Radio horizontal R_h(m)	9.55
Radio de cabeceo R_c(m)	10.61

5.1.5 Cálculo del período y amortiguamiento de la estructura con efectos ISE

5.1.5.1 Método función de transferencia

A continuación, se realizará el cálculo de las propiedades de la estructura con efectos ISE, se toman los valores de las propiedades de estructura, cimentación y suelo calculados en los capítulos anteriores.

Se resumen los datos calculados previamente para el sentido X-X:

Tabla 29. Resumen de parámetros de edificio A

Parámetros de la estructura	
Masa equivalente me(t-s²/m)	516.03
% masa participante	76.83%
Período equivalente Te(s)	2.87
Altura equivalente He(m)	51.57
Rigidez equivalente Ke(t/m)	2468.13
Fracción de amortiguamiento de la estructura ξ%	5%
Amortiguamiento de la estructura Ce(t-s/m)	112.85
Frecuencia circular ωe(rad/s)	2.18
Altura total Ht=He+D(m)	54.97
Parámetros de la fundación	
Base(m)	20.40
Profundidad(m)	14.05
Desplante D(m)	3.40
Radio horizontal R_h(m)	9.55
Radio de cabeceo R_c(m)	8.80

Parámetros del suelo	
Módulo de cortante G (t/m²)	7841.04
Velocidad equivalente del suelo Vs(m/s)	226.45
Coeficiente de poisson v	0.45
Amortiguamiento del suelo ξs%	5%
Profundidad del suelo Hs(m)	30.00
Periodo del estrato Ts(s)	0.53

a) Rigideces Estáticas y factores de Rigidez y amortiguamiento

Sobre la metodología indicada, se aplican las ecuaciones 43, 44, 46, 47

Tabla 30. Valores de Rigideces Estáticas, Factores de Rigidez y amortiguamiento.

Parámetros calculados para el ejemplo	
Rigidez estática horizontal K_h^e (t/m)	632970.2
Rigidez estática de cabeceo K_c^e (t-m/rad)	52084588.4
Frecuencia adimensional lateral a_s	0.5
Frecuencia adimensional vertical a_p	1.5

b) Parámetros variables

Se calculan para diferentes valores de T_i (período de excitación) desde 0.3 s hasta 4.0s aproximadamente; con un incremento del período de 0.1 s con esto se tiene para cada T_i su respectiva frecuencia ω_i ; se muestra como ejemplo los cálculos para un $T_i = 0.3$ s, $T_i = 2.873$ s y $T_i = 4$ s con la finalidad de que se pueda comparar los resultados si el lector desarrolla el método, esto es de manera didáctica, al final se tiene tantos parámetros como períodos se discreticen. Sobre las ecuaciones mostradas en el numeral 4.4.2.3

Tabla 31. Valores de los Parámetros variables para algunos T_i .

Parámetros variables			
T_i(s)	0.30	2.873	4.00
ω_i(Rad/s)	20.94	2.19	1.57
a_{oh}	0.88	0.09	0.07
a_{oc}	0.81	0.09	0.06
a_{oh/as}	1.77	0.18	0.13
a_{oc/ap}	0.53	0.06	0.04

c) Rigidez horizontal Kh y Rigidez de cabeceo Kc

Se muestran los valores para diferentes períodos, a manera de ejemplo se incluye el cálculo cuando $T_i = 0.3$ s, $T_i = T_e$ y $T_i = 4.0$ s

Tabla 32. Factores adimensionales de rigidez

Factores adimensionales de rigidez			
T_i (s)	0.3	2.873	4.0
K_h	1	1	1
K_c	0.84	0.98	0.99

d) Factores de amortiguamiento horizontal y de cabeceo

Tabla 33. Factores adimensionales de amortiguamiento

Factores adimensionales de amortiguamiento			
T_i (s)	0.3	2.873	4.0
c_h	0.576	0.006	0.004
c_c	0.018	0.001	0.001

e) Matrices de rigidez, masa y amortiguamiento

Con los valores obtenidos se ensamblan las matrices según la ecuación 64. Los resultados de estas matrices se han obtenido de tal manera q el lector pueda corroborar que las iteraciones son correctas.

Tabla 34. Matrices K , M y C para un $T_i = 0.3$ s.

K			M			C (amortiguamiento)		
2468.13	0.0	0.0	516.04	516.04	28366.47	112.86	0.00	0.00
0.0	600761.9	0.0	516.04	516.04	28366.47	0.00	18400.49	0.00
0.0	0.0	43528331.8	28366.47	28366.47	1559305.07	0.00	0.00	244390.79

Tabla 35. Matrices K , M y C para un $T_i = 2.873$ s.

K			M			C (amortiguamiento)		
2468.13	0.0	0.0	516.04	516.04	28366.47	112.86	0.00	0.00
0.0	632934.1	0.0	516.04	516.04	28366.47	0.00	29107.80	0.00
0.0	0.0	51198438.3	28366.47	28366.47	1559305.07	0.00	0.00	2343910.46

Tabla 36. Matrices K , M y C para un $T_i = 4.0$ s.

K			M			C (amortiguamiento)		
2468.13	0.0	0.0	516.04	516.04	28366.47	112.86	0.00	0.00
0.0	632951.8	0.0	516.04	516.04	28366.47	0.00	40412.93	0.00
0.0	0.0	51448235.5	28366.47	28366.47	1559305.07	0.00	0.00	3277341.26

f) Vector componente del vector F

Si consideramos $\{F\} = \omega_i^2 X_g \begin{Bmatrix} M_e \\ M_e \\ M_e H_T \end{Bmatrix}$ el vector f llamaremos a lo inscrito entre llaves.

Tabla 37. Vector f componente de $\{F\}$

Vector {f}
516.04
516.04
28366.47

g) Solución de la ecuación matricial dinámica de estructuras

Una vez se tienen las matrices K y M se puede determinar Z como una suma de matrices A más iB , en la metodología encontramos la equivalencia de A y B en el numeral 4.4.2.7 literal b.

Tabla 38. Matrices A y B para un $T_i = 0.3$ s

Z						
A			+i	B		
-223890.3892	-226358.5196	-12442927.82		2363.646219	0	0
-226358.5196	374403.4216	-12442927.82		0	385379.0261	0
-12442927.82	-12442927.82	-640459410.6		0	0	5118508.716

Tabla 39. Matrices A y B para un $T_i = 2.873$ s

Z						
A			+i	B		
0	-2468.130406	-135673.1284		246.8130406	0	0
-2468.130406	630465.9227	-135673.1284		0	63658.08343	0
-135673.1284	-135673.1284	43740486.38		0	0	5126078.59

Tabla 40. Matrices A y B para un $T_i = 4.0$ s

Z						
A			+i	B		
1194.863734	-1273.266673	-69991.469		177.2734664	0	0
-1273.266673	631678.5294	-69991.469		0	63480.47717	0
-69991.469	-69991.469	47600804.41		0	0	5148035.61

Habiendo obtenido A y B podemos calcular C:

Tabla 41. Cálculo de Matriz C para un $T_i = 0.3 s$

$B.A^{-1}$			$B.A^{-1}.B$		
0.135310682	-0.003378513	-0.002563195	319.8265814	-1302.007911	-13119.73674
-0.550847204	0.639220691	-0.001716931	-1302.007911	246342.2475	-8788.12878
-5.550634708	-0.022803858	0.100289548	-13119.73674	-8788.12878	513332.9278

$A+B.A^{-1}.B$			C $[A] + [B][A]^{-1}[B]]^{-1}$		
-223570.5626	-227660.5275	-12456047.56	5.3688E-05	-9.14619E-07	-1.0272E-06
-227660.5275	620745.6691	-12451715.95	-9.14619E-07	1.1743E-06	-5.04648E-09
-12456047.56	-12451715.95	-639946077.6	-1.0272E-06	-5.04648E-09	1.85292E-08

Tabla 42. Cálculo de Matriz C para un $T_i = 2.873 s$

$B.A^{-1}$			$B.A^{-1}.B$		
-0.56859636	-0.002607196	-0.001771745	-140.3369965	-165.9690878	-9082.10239
-0.672448617	0.097953953	-0.001781953	-165.9690878	6235.560919	-9134.430812
-36.79749809	-0.14349208	0.002610371	-9082.10239	-9134.430812	13380.96562

$A+B.A^{-1}.B$			C $[A] + [B][A]^{-1}[B]]^{-1}$		
-140.3369965	-2634.099494	-144755.2308	-0.001576098	-7.71221E-06	-5.23988E-06
-2634.099494	636701.4836	-144807.5593	-7.71221E-06	1.53404E-06	-2.0438E-08
-144755.2308	-144807.5593	43753867.35	-5.23988E-06	-2.0438E-08	5.45186E-09

Tabla 43. Cálculo de Matriz C para un $T_i = 4.0 s$

$B.A^{-1}$			$B.A^{-1}.B$		
0.162792917	0.00035472	0.00023989	28.85886465	22.51779687	1234.960725
0.12702294	0.100788064	0.00033497	22.51779687	6398.074419	1724.435908
6.966416069	0.027164823	0.118433432	1234.960725	1724.435908	609699.523

$A+B.A^{-1}.B$			C $[A] + [B][A]^{-1}[B]]^{-1}$		
1223.722598	-1250.748876	-68756.50827	0.000890618	1.88196E-06	1.27284E-06
-1250.748876	638076.6038	-68267.03309	1.88196E-06	1.57142E-06	4.90916E-09
-68756.50827	-68267.03309	48210503.94	1.27284E-06	4.90916E-09	2.25646E-08

Teniendo la matriz C podemos calcular la matriz D señalada anteriormente:

Tabla 44. Matriz D para un $T_i = 0.3 s$

$[D] = -[C][B][A]^{-1}$		
-1.347E-05	7.42605E-07	2.3906E-07
7.42605E-07	-7.5384E-07	1.77949E-10
2.3906E-07	1.77949E-10	-4.49985E-09

Tabla 45. Matriz D para un $T_i = 2.873$ s

$[D] = -[C][B][A]^{-1}$		
-0.001094164	-4.10564E-06	-2.79251E-06
-4.10564E-06	-1.73305E-07	-1.08771E-08
-2.79251E-06	-1.08771E-08	-9.33439E-09

Tabla 46. Matriz D para un $T_i = 4.0$ s

$[D] = -[C][B][A]^{-1}$		
-0.000154093	-5.40176E-07	-3.65027E-07
-5.40176E-07	-1.59182E-07	-1.55925E-09
-3.65027E-07	-1.55925E-09	-2.97939E-09

Obtenidos C y D podemos ensamblar Z^{-1}

Tabla 47. Matriz Z^{-1} para un $T_i = 0.3$ s

$[Z]^{-1} = [C] + i[D]$						
C			+i	D		
5.3688E-05	-9.14619E-07	-1.0272E-06		-1.347E-05	7.42605E-07	2.3906E-07
-9.14619E-07	1.1743E-06	-5.04648E-09		7.42605E-07	-7.5384E-07	1.77949E-10
-1.0272E-06	-5.04648E-09	1.85292E-08		2.3906E-07	1.77949E-10	-4.49985E-09

Tabla 48. Matriz Z^{-1} para un $T_i = 2.873$ s

$[Z]^{-1} = [C] + i[D]$						
C			+i	D		
-0.001576098	-7.71221E-06	-5.23988E-06		-0.001094164	-4.10564E-06	-2.79251E-06
-7.71221E-06	1.53404E-06	-2.0438E-08		-4.10564E-06	-1.73305E-07	-1.08771E-08
-5.23988E-06	-2.0438E-08	5.45186E-09		-2.79251E-06	-1.08771E-08	-9.33439E-09

Tabla 49. Matriz Z^{-1} para un $T_i = 4.0$ s

$[Z]^{-1} = [C] + i[D]$						
C			+i	D		
0.000890618	1.88196E-06	1.27284E-06		-0.000154093	-5.40176E-07	-3.65027E-07
1.88196E-06	1.57142E-06	4.90916E-09		-5.40176E-07	-1.59182E-07	-1.55925E-09
1.27284E-06	4.90916E-09	2.25646E-08		-3.65027E-07	-1.55925E-09	-2.97939E-09

Y se obtiene el vector de desplazamientos $\{x\}$, multiplicando $[C]$ por $\{f\}$ para la parte real y $[D]$ por $\{f\}$ para la parte imaginaria.

Tabla 50. Vector de desplazamientos para un $T_i = 0.3$ s

	Término real	Término imaginario
<i>U</i>	-0.00190506	0.000213505
<i>H</i>	-9.14776E-06	-7.50009E-07
<i>θ</i>	-7.06786E-06	-4.18991E-06

Tabla 51. Vector de desplazamientos para un $T_i = 2.873$ s

	Término real	Término imaginario
<i>U</i>	-0.965939138	-0.645959742
<i>H</i>	-0.003767907	-0.002516631
<i>θ</i>	-0.002559863	-0.001711143

Tabla 52. Vector de desplazamientos para un $T_i = 4.0$ s

	Término real	Término imaginario
<i>U</i>	0.496667943	-0.090150534
<i>H</i>	0.001921323	-0.000405124
<i>θ</i>	0.001299443	-0.000273687

h) Resultados por el método función de transferencia.

Se calcula para cada período T_i con la ecuación 88.

Finalmente se divide el período iterado para el período de la estructura con base empotrada para graficar la curva: $\frac{T_i}{T_e}$ vs. $\frac{\omega_e^2 U}{\ddot{x}_g}$ que se genera con cada iteración; el punto máximo corresponde al período con efectos de interacción suelo-estructura T_{ise} .

Tabla 53. Valores de $\frac{T_i}{T_e}$ vs. $\frac{\omega_e^2 \cdot U}{\ddot{x}_g}$ para estructura A.

$T_i(s)$	$\omega_e^2 \cdot U / \ddot{x}_g$	T_i / T_e
0.30	0.009	0.104
0.60	0.039	0.209
0.90	0.093	0.313
1.20	0.178	0.418
1.80	0.516	0.627
2.10	0.861	0.731
2.70	3.127	0.940
2.873	5.495	1.00
3.085	10.629	1.074
3.24	7.580	1.128
3.60	3.565	1.253
3.70	3.15	1.29
3.90	2.602	1.357
4.00	2.414	1.392

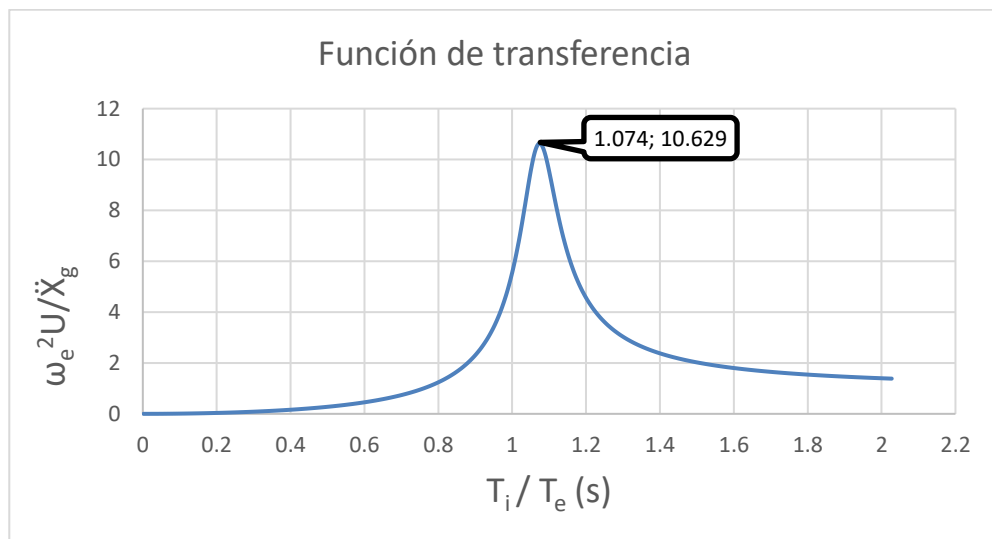


Figura 25. Función de transferencia edificio A.

Los valores de la curva corresponden a la relación $\frac{T_i}{T_e}$ vs. $\frac{\ddot{U}}{\ddot{x}_s}$

El punto máximo corresponde a:

$$\frac{\ddot{U}}{\ddot{x}_s} \text{ máx} = 10.629$$

$$\frac{T_i}{T_e} = 1.074$$

Por lo tanto:

$$T_{ise} = 1.074 * 2.873 \text{ s}$$

$$T_{ise} = 3.085 \text{ s}$$

Se calcula el amortiguamiento con el valor máximo de la función:

$$\xi_{ise} = \frac{1}{2(W_e^2 \cdot U/\ddot{x}g)} \quad (90)$$

$$\xi_{ise} = \frac{1}{2(10.629)}$$

$$\xi_{ise} = 4.70 \%$$

6. CRITERIOS DE DISEÑO.

Para el diseño estructural de la cimentación según NEC-SE-GC-2015 tenemos:

El fenómeno de la interacción dinámica suelo-estructura se compone por la interacción inercial y la interacción cinemática. Los efectos inerciales afectan directamente al comportamiento de la estructura; aumentan el periodo fundamental de vibración, modifican el amortiguamiento y, hasta donde se tiene conocimiento, reducen la ductilidad. Estos fenómenos ocurren por el aumento de flexibilidad que sufre la estructura al encontrarse sin empotramiento fijo en su base. La interacción cinemática se refiere al comportamiento de la cimentación, la que por su geometría y rigidez filtra las altas frecuencias de la excitación. La cimentación, al incorporarse al sistema, experimenta efectos de torsión y cabeceo, lo que origina, generalmente, reducción en su movimiento.

6.1 Procedimiento de cálculo del Diseño Basado en Fuerzas (DBF) de acuerdo a la NEC-SE-DS-2015, sección 6.3 (2015):

6.1.1 Pasos del método

Los pasos a seguir son los siguientes:

6.1.1.1 Determinación del espectro de diseño $S_a(T)$

De acuerdo con las características geotectónicas del lugar de emplazamiento de la estructura (véase en la sección 3.3 NEC-SE-DS-2015)

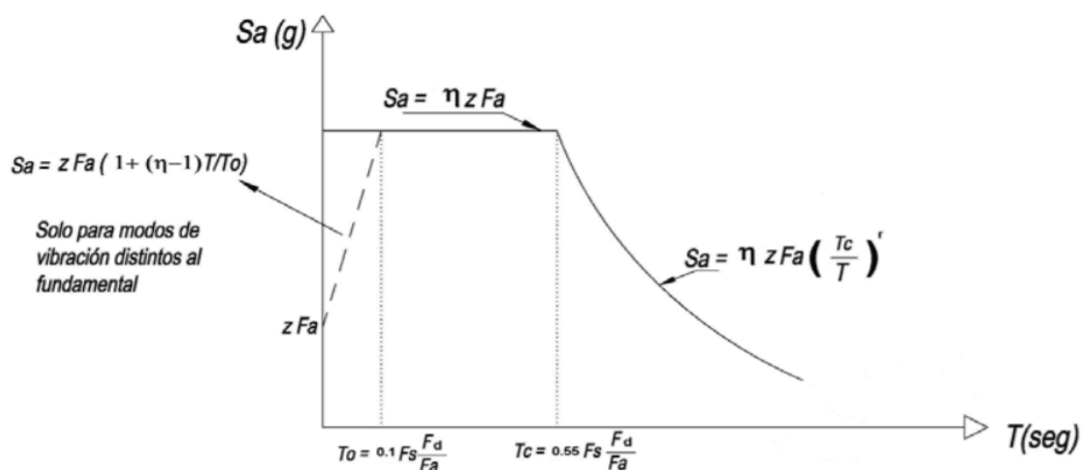


Figura 26. Espectro de diseño

Donde:

- η Razón entre la aceleración espectral S_a a periodo estructural $T = 0.1$ s y el PGA para el periodo de retorno seleccionado. Su valor depende de la región del Ecuador.
- z Aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad g .

F_a	Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto.
F_d	Amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca
F_s	Comportamiento no lineal de los suelos.
r	Factor usado en el espectro de diseño elástico, cuyos valores dependen de la ubicación geográfica del proyecto.

6.1.1.2 Período fundamental T_a , T o T_e y respuesta elástica de aceleración $S_a(T_a)$

Se aplica la metodología según el numeral 4.2.3.2

6.1.1.3 Determinación del cortante de base V con los resultados de los pasos anteriores.

Cortante basal de diseño V , según la sección 6.3.2 (NEC-SE-DS-2015)

El cortante basal total de diseño V , a nivel de cargas últimas, aplicado a una estructura en una dirección especificada, se determinará mediante las expresiones:

$$V = \frac{IS_a(T_a)}{R\phi_P\phi_E} \cdot W \quad (92)$$

Dónde:

$S_a(T_a)$	Espectro de diseño en aceleración; véase 6.1.1.1
ϕ_P y ϕ_E	Coeficientes de configuración en planta y elevación; sección 5.3 (NEC-SE-HM,2015)
I	Coeficiente de importancia; sección 4.1 (NEC-SE-HM,2015)
R	Factor de reducción de resistencia sísmica; sección 6.3.4 (NEC-SE-HM,2015)
V	Cortante basal total de diseño.
W	Carga sísmica reactiva ⁸ ; véase en la sección 6.1.7 (NEC-SE-HM,2015)
T_a	Período de vibración; véase 4.2.3

6.1.1.4 Representación y determinación de la carga sísmica horizontal:

La base del análisis constituirá una representación apropiada de la acción sísmica, de conformidad con los principios de la dinámica estructural. La acción sísmica determinada mediante un procedimiento dinámico debe representar, como mínimo, al sismo de diseño (período de retorno de 475 años), sin la aplicación del factor de reducción de respuesta R , y puede ser, el espectro de respuesta elástico de aceleraciones, expresado como fracción de la aceleración de la gravedad, es proporcionado en la sección 3.3.1(NEC-SE-DS-2015).

⁸ Para casos generales, W es la carga muerta total de la estructura, para el caso de bodegas y almacenaje, W es la carga muerta total más el 25% de la carga viva por piso.

6.1.1.5 Cálculo de las fuerzas horizontales aplicando la NEC-SE-DS-2015

Distribución vertical de fuerzas sísmicas laterales (sección 6.3.5, NEC-SE-DS-2015)

La distribución de fuerzas verticales se asemeja a una distribución lineal (triangular), similar al modo fundamental de vibración, pero dependiente del período fundamental de vibración T_a .

En ausencia de un procedimiento más riguroso, basado en los principios de la dinámica, las fuerzas laterales totales de cálculo deben ser distribuidas en la altura de la estructura, utilizando las siguientes expresiones:

$$V = \sum_{i=1}^n F_i \quad ; \quad V_x = \sum_{i=x}^n F_i \quad ; \quad F_x = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} V \quad (93) ; (94) ; (95)$$

Dónde:

V Cortante total en la base de la estructura (determinado con ecuación 92)

V_x Cortante total en el piso x de la estructura

F_i Fuerza lateral aplicada en el piso i de la estructura

F_x Fuerza lateral aplicada en el piso x de la estructura

n Número de pisos de la estructura

w_x Peso asignado al piso o nivel x de la estructura, siendo una fracción de la carga reactiva

w_i Peso asignado al piso o nivel i de la estructura, siendo una fracción de la carga reactiva

h_x Altura del piso x de la estructura

h_i Altura del piso i de la estructura

k Coeficiente relacionado con el período de vibración de la estructura T

6.1.1.6 Cálculo del cortante basal por medio de la herramienta Etabs® de la estructura empotrada:

a) Patrón de carga sísmica (Load Pattern) para estructura empotrada.

Para determinar las fuerzas horizontales se ha creado un caso llamado FHEx (fuerza horizontal equivalente en el sentido X) de tipo sismo y coeficientes de usuario.

El coeficiente C “Base Shear Coefficient” en la ventana Seismic Load Pattern corresponde a los factores y coeficientes usados para el cálculo del cortante basal sin considerar la carga sísmica reactiva W .

$$V = \frac{I S_a(T_a)}{R \phi_P \phi_E} \cdot W \quad (92)$$

El valor K se determina según la tabla, dependiendo del período fundamental, este valor se coloca en la casilla Building Height Exp., K

Tabla 54. Factor K

Valores de T(s)	K
≤ 0.5	1
$0.5 < T \leq 2.5$	$0.75 + 0.50 T$
> 2.5	2

Se muestra a continuación las ventanas del patrón de carga sísmica en donde se colocan los valores de C y K:

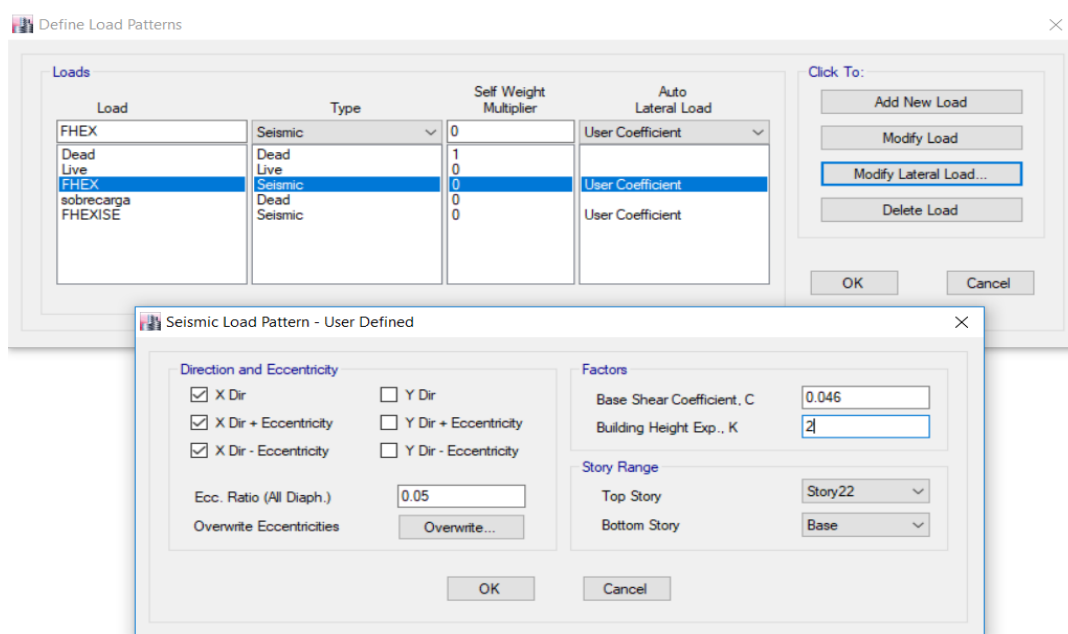


Figura 27. Ventanas de patrón de carga sísmica en Etabs ®

El valor de cortante basal y la distribución de fuerzas horizontales se encuentran en la ventana *Story Response* activando *Story shears* para el caso FHEX creado anteriormente.

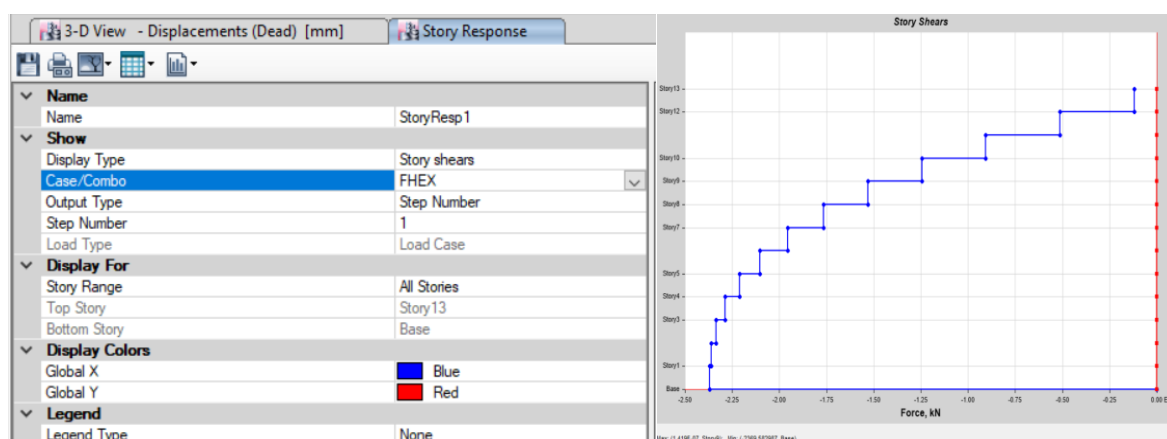


Figura 28. Fuerzas horizontales y cortante Basal

6.2 Dirección de aplicación de las fuerzas sísmicas y verificación de que los índices de deriva no sobrepasen el valor permitido.

Para el caso FHEX, fuerza horizontal equivalente en el sentido X obtenemos los valores máximos de desplazamiento horizontal tanto en el sentido X como en Y en la ventana *Story Response* activando *Max story displ.*

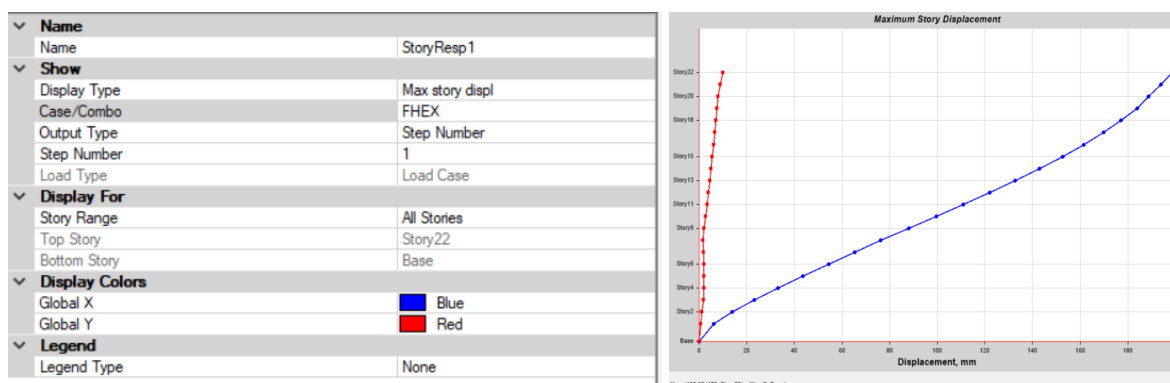


Figura 29. Máximos desplazamientos por piso

La tabla de desplazamientos máximos por piso se obtiene para calcular las derivas y verificar según la norma que se cumpla lo siguiente:

6.2.1 Límites de la deriva:

La deriva máxima inelástica Δ_M de cada piso debe calcularse mediante:

$$\Delta_M = 0.75R\Delta_E \quad (96)$$

Dónde:

Δ_M Deriva máxima inelástica

Δ_E Desplazamiento obtenido en aplicación de las fuerzas laterales de diseño reducidas

R Factor de reducción de resistencia (véase la sección 6.3.4 NEC-SE-HM,2015)

Regla: Δ_M no puede superar los valores establecidos en la Tabla 7, los cuales deben satisfacerse en todas las columnas del edificio.

Se verificará que:

$$\Delta_M < \Delta_M \text{ máxima} \quad (97)$$

Dónde:

Δ_M Máxima se determina conforme a la sección 4.2.2 de la NEC-SE-DS-2015

$$\Delta = \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2} \quad (98)$$

$$\Delta_E = \Delta_n - \Delta_{n-1} \quad (99)$$

$$\Delta_M = 0.75 * R * \Delta_E \quad (100)$$

$$\Delta_{M \text{ máx}} = 0.02 * h_i \text{ (NEC-SE-DS-2015 4.2.2)} \quad (101)$$

6.3 Aplicación de los criterios de diseño para el edificio A (empotrado) sentido X

El proyecto se encuentra ubicado en la provincia de Esmeraldas, y de acuerdo con la velocidad de onda $V_s = 226.45$ m/s calculada en capítulos anteriores sabemos que corresponde a un perfil de suelo tipo D.

Tabla 55. Tipo de perfil de suelo

Tipo de Perfil	Descripción	Definición
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ $100 \text{ kPa} > S_u \geq 50 \text{ kPa}$

Fuente: Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS-2015, tabla 2)

6.3.1 Espectro de diseño

Conocida la ubicación y el tipo de perfil de suelo tenemos:

Tabla 56. Valores paramétricos para determinar el espectro de diseño

η: Razón entre la aceleración espectral S_a a período estructural $T = 0.1$ s y el PGA para el período de retorno seleccionado. Su valor depende de la región del Ecuador.	
Región del Ecuador	η
Provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos	2.48

Z: Aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad g	
Factor de Zona sísmica	Z
VI	0.5

F_a : Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto. F_d : Amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca F_s : Comportamiento no lineal de los suelos r : Factor usado en el espectro de diseño elástico, cuyos valores dependen de la ubicación geográfica del proyecto $r = 1$ para todos los suelos, con excepción del suelo tipo E $r = 1.5$ para tipo de suelo E.				
Tipo de perfil del subsuelo	F_a	F_d	F_s	r
D	1.12	1.11	1.4	1

T_o	0.1388
T_c	0.763

Se pudo verificar que, en el espectro que produce Etabs® a pesar de haberse introducido los valores del ejercicio que llevamos a cabo, calcula valores distintos a los calculados de forma manual; por lo que se usará el espectro elaborado manualmente.

Para la estructura tenemos los períodos fundamentales en el sentido X e Y obtenidos en la tabla 25:

Periodo Modo 1 (sentido X-X)= 2.873 s

Periodo Modo 2 (sentido Y-Y)= 2.243 s

6.3.2 Respuesta elástica de aceleración S_a

La respuesta elástica de aceleración S_a correspondiente al período T_a o T_e del ejemplo se muestra a continuación.

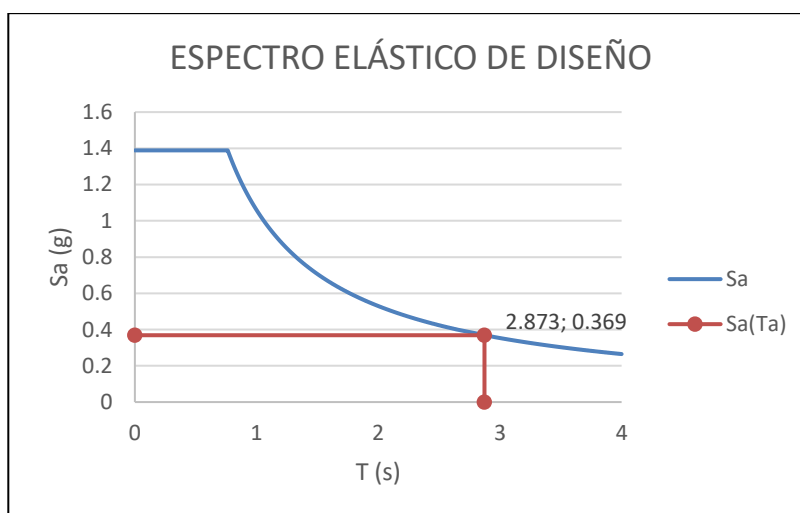


Figura 32. Espectro elástico de diseño

6.3.3 Cortante Basal

Para el ejercicio en desarrollo tenemos:

$$V = \frac{1 \times 0.369}{8 \times 1 \times 1} \times (6588973.97 g \times 9.81 \frac{m}{s^2})$$

$$V = 2981.42 \text{ KN} = 303.92 \text{ t}$$

6.3.4 Cálculo de las fuerzas horizontales

a) Aplicando las expresiones de la NEC-SE-DS-2015

Aplicando las ecuaciones 93,94,95 podemos calcular las fuerzas horizontales para cada piso.

Tabla 58. Fuerzas cortantes por piso cálculo manual

TABLE: Mass Summary by Story											
Story	UX	UY	UZ	hi	hx	w _x =m*g	w _x h _x ^k	%=	w _x h _x ^k	Fi= V*%	Vx
	kg	kg	kg	m	m	kN	.		Σw _i h _i ^k	kN	kN
Story22	169900.49	169900.49	0	3.06	68.76	1666.7238	7880166.155		0.078	233.430266	233.4303
Story21	204730.78	204730.78	0	3.06	65.7	2008.4090	8669277.156		0.086	256.805712	490.2360
Story20	204730.78	204730.78	0	3.06	62.64	2008.4090	7880533.989		0.078	233.441163	723.6771
Story19	312737.48	312737.48	0	3.06	59.58	3067.9547	10890553.12		0.108	322.605471	1046.2826
Story18	312737.48	312737.48	0	3.06	56.52	3067.9547	9800613.128		0.097	290.318718	1336.6013
Story17	312737.48	312737.48	0	3.06	53.46	3067.9547	8768127.342		0.087	259.733902	1596.3352
Story16	312737.48	312737.48	0	3.06	50.4	3067.9547	7793095.757		0.077	230.851023	1827.1863
Story15	312737.48	312737.48	0	3.06	47.34	3067.9547	6875518.373		0.068	203.670082	2030.8563
Story14	312737.48	312737.48	0	3.06	44.28	3067.9547	6015395.189		0.060	178.191078	2209.0474
Story13	312737.48	312737.48	0	3.06	41.22	3067.9547	5212726.206		0.052	154.414012	2363.4614
Story12	312737.48	312737.48	0	3.06	38.16	3067.9547	4467511.425		0.044	132.338882	2495.8003
Story11	312737.48	312737.48	0	3.06	35.1	3067.9547	3779750.844		0.038	111.965691	2607.7660
Story10	312737.48	312737.48	0	3.06	32.04	3067.9547	3149444.464		0.031	93.2944364	2701.0604
Story9	312737.48	312737.48	0	3.06	28.98	3067.9547	2576592.285		0.026	76.3251195	2777.3856
Story8	312737.48	312737.48	0	3.06	25.92	3067.9547	2061194.306		0.020	61.05774	2838.4433
Story7	312737.48	312737.48	0	3.06	22.86	3067.9547	1603250.529		0.016	47.4922979	2885.9356
Story6	312737.48	312737.48	0	3.06	19.8	3067.9547	1202760.952		0.012	35.6287931	2921.5644
Story5	312737.48	312737.48	0	3.06	16.74	3067.9547	859725.5765		0.009	25.4672258	2947.0316
Story4	312737.48	312737.48	0	3.06	13.68	3067.9547	574144.4017		0.006	17.0075958	2964.0392
Story3	312737.48	312737.48	0	3.06	10.62	3067.9547	346017.4277		0.003	10.2499032	2974.2891
Story2	312737.48	312737.48	0	3.06	7.56	3067.9547	175344.6545		0.002	5.19414802	2979.4833
Story1	329138.95	329138.95	0	4.5	4.5	3228.8531	65384.27526		0.001	1.93684606	2981.4201
Base	51198.29	51198.29	0	0	0	502.2552	0		0.000	0	2981.4201
m= 6588973.93						Σw _i h _i ^k	100647127.6		1	2981.420	
V= 2981420.105 N											
V= 303.92 t											

b) Cálculo con Etabs ®

Una vez se haya definido el patrón de cargas FHEX con los valores:

$$C = \frac{1 \times 0.369}{8 \times 1 \times 1} = 0.046 \quad \text{calculado como componente del cortante basal según ecuación 92.}$$

$$K = 2$$

$$T_e > 2.5$$

Se genera la tabla 59 en donde se muestran las fuerzas por piso:

Tabla 59. Fuerzas horizontales obtenidas en Etabs®

TABLE: Story Forces								
Story	Load Case/Combo	Location	P	VX	VY	T	MX	MY
			kN	kN	kN	kN-m	kN-m	kN-m
Story22	FHEX 1	Top	0	-230.5424	0	1413.4904	0	0
Story21	FHEX 1	Top	0	-484.6073	0	3017.9649	0	-706.0219
Story20	FHEX 1	Top	0	-715.5585	0	4476.4793	0	-2189.4336
Story19	FHEX 1	Top	0	-1034.7098	0	6333.659	0	-4379.5092
Story18	FHEX 1	Top	0	-1321.9215	0	8004.9872	0	-7546.1433
Story17	FHEX 1	Top	0	-1578.8772	0	9500.2595	0	-11591.6031
Story16	FHEX 1	Top	0	-1807.2604	0	10829.2721	0	-16423.3073
Story15	FHEX 1	Top	0	-2008.7547	0	12001.8208	0	-21953.8262
Story14	FHEX 1	Top	0	-2185.0436	0	13027.7015	0	-28100.882

Story13	FHEX 1	Top	0	-2337.8107	0	13916.7102	0	-34787.3486
Story12	FHEX 1	Top	0	-2468.7396	0	14678.6428	0	-41941.2515
Story11	FHEX 1	Top	0	-2579.5138	0	15323.2952	0	-49495.7679
Story10	FHEX 1	Top	0	-2671.8169	0	15860.4634	0	-57389.2266
Story9	FHEX 1	Top	0	-2747.3324	0	16299.9432	0	-65565.1085
Story8	FHEX 1	Top	0	-2807.744	0	16651.5306	0	-73972.0456
Story7	FHEX 1	Top	0	-2854.7351	0	16925.0215	0	-82563.8222
Story6	FHEX 1	Top	0	-2889.9894	0	17130.2118	0	-91299.3738
Story5	FHEX 1	Top	0	-2915.1903	0	17276.8975	0	-100142.7879
Story4	FHEX 1	Top	0	-2932.0215	0	17374.8745	0	-109063.3036
Story3	FHEX 1	Top	0	-2942.1665	0	17433.9387	0	-118035.3117
Story2	FHEX 1	Top	0	-2947.3089	0	17463.886	0	-127038.3547
Story1	FHEX 1	Top	0	-2949.2276	0	17475.1949	0	-136057.1268

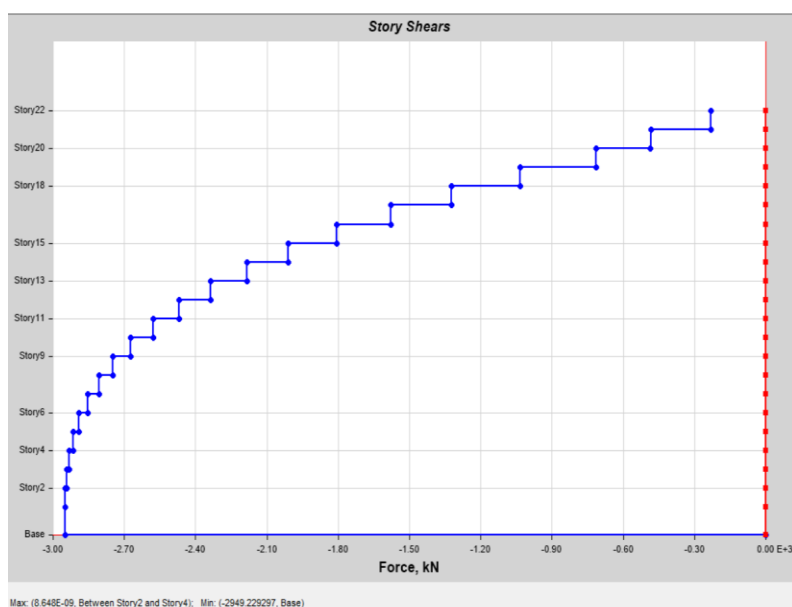


Figura 33. Cortantes por piso sentido X-X

El cortante basal calculado en Etabs ® es: $V = 2949.23 \text{ kN} = 300.64 \text{ t}$

6.3.5 Dirección de aplicación de las fuerzas sísmicas y verificación de que los índices de deriva no sobrepasen el valor permitido.

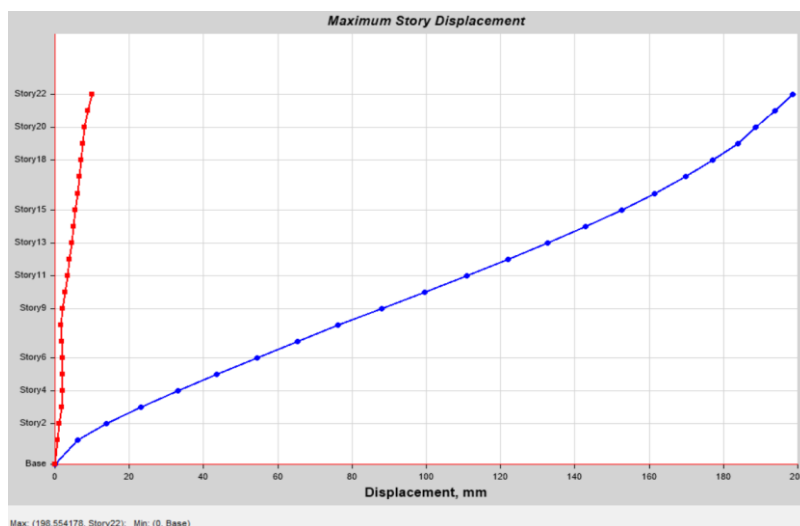


Figura 34. Desplazamientos máximos para FHEX, estructura A, empotrada

Aplicando el procedimiento según se muestra en el numeral 6.2 se calculan los índices de deriva a partir de los desplazamientos máximos:

Tabla 60. Control de derivas, aplicando las fuerzas horizontales en el sentido X estructura empotrada, parámetros de suelo reales.

TABLE: Story Response											
Story	Elevation	Location	X-Dir	Y-Dir	Δ	ΔE	ΔM	%	ΔM máx	$\Delta M - \Delta M$ máx	$\Delta M < \Delta M$ máx
	m		mm	mm	mm	mm	mm		mm	mm	
Story22	68.76	Top	198.554	9.96	198.80	4.72	28.33	0.93%	61.2	32.87	ok
Story21	65.7	Top	193.884	8.759	194.08	5.19	31.16	1.02%	61.2	30.04	ok
Story20	62.64	Top	188.723	7.884	188.89	4.86	29.15	0.95%	61.2	32.05	ok
Story19	59.58	Top	183.879	7.418	184.03	6.68	40.09	1.31%	61.2	21.11	ok
Story18	56.52	Top	177.21	6.96	177.35	7.48	44.86	1.47%	61.2	16.34	ok
Story17	53.46	Top	169.745	6.496	169.87	8.25	49.52	1.62%	61.2	11.68	ok
Story16	50.4	Top	161.504	6.017	161.62	8.98	53.88	1.76%	61.2	7.32	ok
Story15	47.34	Top	152.536	5.519	152.64	9.64	57.84	1.89%	61.2	3.36	ok
Story14	44.28	Top	142.909	4.999	143.00	10.22	61.31	2.00%	61.2	-0.11	no cumple
Story13	41.22	Top	132.704	4.457	132.78	10.71	64.26	2.10%	61.2	-3.06	no cumple
Story12	38.16	Top	122.007	3.897	122.07	11.11	66.64	2.18%	61.2	-5.44	no cumple
Story11	35.1	Top	110.912	3.322	110.96	11.41	68.47	2.24%	61.2	-7.27	no cumple
Story10	32.04	Top	99.513	2.738	99.55	11.61	69.67	2.28%	61.2	-8.47	no cumple
Story9	28.98	Top	87.913	2.152	87.94	11.71	70.24	2.30%	61.2	-9.04	no cumple
Story8	25.92	Top	76.217	1.579	76.23	10.98	65.88	2.15%	61.2	-4.68	no cumple
Story7	22.86	Top	65.229	1.798	65.25	10.86	65.16	2.13%	61.2	-3.96	no cumple
Story6	19.8	Top	54.357	2.019	54.39	10.74	64.42	2.11%	61.2	-3.22	no cumple
Story5	16.74	Top	43.607	2.091	43.66	10.47	62.82	2.05%	61.2	-1.62	no cumple
Story4	13.68	Top	33.127	1.993	33.19	10.00	60.02	1.96%	61.2	1.18	ok
Story3	10.62	Top	23.12	1.707	23.18	9.20	55.18	1.80%	61.2	6.02	ok
Story2	7.56	Top	13.931	1.243	13.99	7.86	47.19	1.54%	61.2	14.01	ok
Story1	4.5	Top	6.08	0.712	6.12	6.12	36.73	1.20%	90	53.27	ok
Base	0	Top	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00%	61.2	61.20	ok

Los valores de derivas de los pisos quinto al catorceavo exceden el valor máximo permitido, esto sin haber considerado los efectos de interacción suelo estructura, de esta manera se debe modificar las secciones o resistencia del hormigón. Ahora se realiza un análisis usando el nuevo período calculado con ISE.

6.4 Distribución de fuerzas horizontales y derivas calculadas con ISE.

6.4.1 S_a para un T_{ISE} en sentido X

Buscamos en el espectro el valor de S_a correspondiente al período de la estructura con efectos ISE

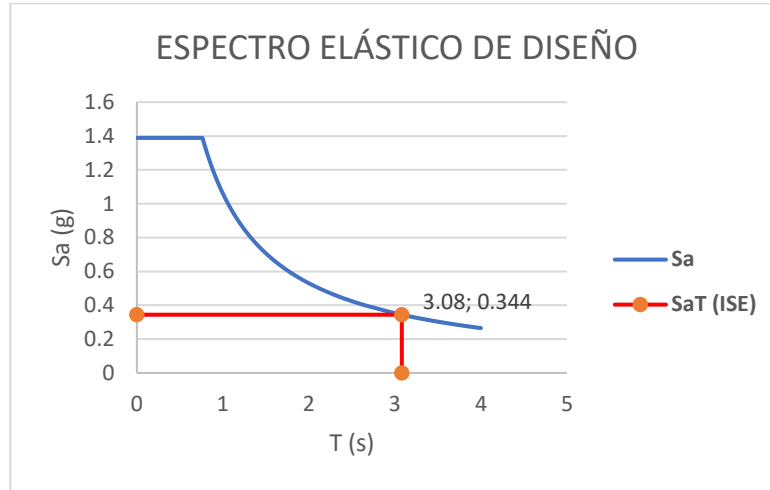


Figura 35. S_a para T_{ISE} sentido x

Este valor corresponde a un espectro que obedece a una fracción de amortiguamiento respecto al crítico de 5%, esta aceleración se modifica cuando consideramos el amortiguamiento crítico del sistema estructural con efectos ISE. Para ello tenemos que:

$$Sa(T_{ISE})^* = Sa(T_{ISE}) \left(\frac{0.05}{\xi_{ise}} \right)^{0.4} \quad (102)$$

Donde:

- ξ_{ise} Amortiguamiento crítico del sistema estructural con efectos ISE
- $SaT(ISE)$ Aceleración espectral correspondiente al período del sistema estructural con efectos ISE sobre un espectro que obedece a una fracción de amortiguamiento respecto al crítico de 5%
- $SaT(ISE)^*$ Aceleración espectral correspondiente al período del sistema estructural con efectos ISE calculada sobre un espectro con una fracción de amortiguamiento respecto al crítico con efectos ISE

Para el ejemplo:

$$Sa(T_{ISE})^* = 0.344 \left(\frac{0.05}{0.047} \right)^{0.4}$$

$$Sa(T_{ISE})^* = 0.35$$

6.4.2 Patrón de carga sísmica (Load Pattern) incluyendo efectos ISE

Para determinar las fuerzas horizontales se ha creado un caso llamado FHEXISE (fuerza horizontal equivalente en el sentido X con ISE), el coeficiente C corresponde a los factores y coeficientes usados para el cálculo del cortante basal sin la carga sísmica reactiva y esta vez se usa el valor de aceleración modificada por el aumento del período debido a los efectos ISE.

$$V = \frac{IS_a(T_{ISE})^*}{R\phi_P\phi_E} \cdot W$$

$$C = \frac{1 \times 0.35}{8 \times 1 \times 1} = 0.043$$

$$K=2$$

6.4.3 Cortante Basal con ISE

$$V = 0.043 \times (6588973.97g \times 9.81 \frac{m}{s^2}) = 2779.43 \text{ KN} = 283.33 \text{ t}$$

$$V = 2756.89 \text{ KN} = 281.03 \text{ t} \quad \text{ETABS}^{\circledR}$$

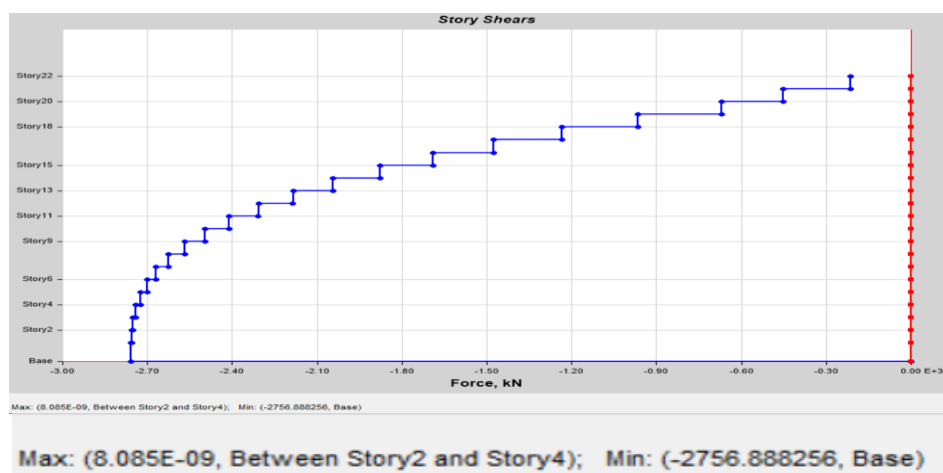


Figura 36. Distribución de fuerzas horizontales Estructura A con efectos ISE

6.4.4 Desplazamientos máximos y derivas

Tabla 61. Control de derivas, aplicando las fuerzas horizontales en el sentido X considerando efectos ISE, parámetros de suelo reales.

TABLE: Story Response											
Story	Elevation	Location	X-Dir	Y-Dir	Δ	ΔE	ΔM	%	ΔM máx	$\Delta M - \Delta M$ máx	$\Delta M < \Delta M$ máx
	m		mm	mm	mm	mm	mm		mm	mm	
Story22	68.76	Top	185.605	9.311	185.84	4.41	26.49	0.87%	61.2	34.71	ok
Story21	65.7	Top	181.239	8.187	181.42	4.85	29.13	0.95%	61.2	32.07	ok
Story20	62.64	Top	176.415	7.37	176.57	4.54	27.25	0.89%	61.2	33.95	ok
Story19	59.58	Top	171.887	6.935	172.03	6.25	37.48	1.22%	61.2	23.72	ok
Story18	56.52	Top	165.653	6.506	165.78	6.99	41.94	1.37%	61.2	19.26	ok
Story17	53.46	Top	158.675	6.072	158.79	7.72	46.29	1.51%	61.2	14.91	ok
Story16	50.4	Top	150.971	5.625	151.08	8.39	50.37	1.65%	61.2	10.83	ok
Story15	47.34	Top	142.588	5.159	142.68	9.01	54.06	1.77%	61.2	7.14	ok
Story14	44.28	Top	133.589	4.673	133.67	9.55	57.31	1.87%	61.2	3.89	ok
Story13	41.22	Top	124.049	4.167	124.12	10.01	60.06	1.96%	61.2	1.14	ok
Story12	38.16	Top	114.05	3.643	114.11	10.38	62.30	2.04%	61.2	-1.10	no cumple
Story11	35.1	Top	103.678	3.106	103.72	10.67	64.00	2.09%	61.2	-2.80	no cumple
Story10	32.04	Top	93.023	2.56	93.06	10.85	65.12	2.13%	61.2	-3.92	no cumple
Story9	28.98	Top	82.18	2.012	82.20	10.94	65.66	2.15%	61.2	-4.46	no cumple
Story8	25.92	Top	71.246	1.476	71.26	10.26	61.58	2.01%	61.2	-0.38	no cumple
Story7	22.86	Top	60.975	1.681	61.00	10.15	60.91	1.99%	61.2	0.29	ok
Story6	19.8	Top	50.812	1.887	50.85	10.04	60.22	1.97%	61.2	0.98	ok

Story5	16.74	Top	40.763	1.955	40.81	9.79	58.73	1.92%	61.2	2.47	ok
Story4	13.68	Top	30.966	1.863	31.02	9.35	56.11	1.83%	61.2	5.09	ok
Story3	10.62	Top	21.612	1.596	21.67	8.60	51.58	1.69%	61.2	9.62	ok
Story2	7.56	Top	13.022	1.162	13.07	7.35	44.11	1.44%	61.2	17.09	ok
Story1	4.5	Top	5.684	0.666	5.72	5.72	34.34	0.76%	90	55.66	ok
Base	0	Top	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00%	61.2	61.20	ok

En este caso se aprecia que redujeron las derivas, pero no se consiguieron valores dentro del máximo permitido.

Con el fin de mostrar los beneficios de incluir efectos de ISE se modelará para un suelo hipotético más blando.

6.4.5 Reducción de los desplazamientos horizontales máximos por efectos ISE en el sentido X

Tabla 62. Reducción de desplazamientos por efecto ISE en estructura A, parámetros de suelo reales

ΔM	ΔM (ISE)	% de reducción de desplazamiento
mm	mm	
28.33	26.49	6.95%
31.16	29.13	6.97%
29.15	27.25	6.97%
40.09	37.48	6.96%
44.86	41.94	6.96%
49.52	46.29	6.98%
53.88	50.37	6.97%
57.84	54.06	6.99%
61.31	57.31	6.98%
64.26	60.06	6.99%
66.64	62.3	6.97%
68.47	64	6.98%
69.67	65.12	6.99%
70.24	65.66	6.98%
65.88	61.58	6.98%
65.16	60.91	6.98%
64.42	60.22	6.97%
62.82	58.73	6.96%
60.02	56.11	6.97%
55.18	51.58	6.98%
47.19	44.11	6.98%
36.73	34.34	6.96%
0	0	0.0%

6.5 Aplicación de los criterios de diseño para el edificio A (empotrado) sentido Y

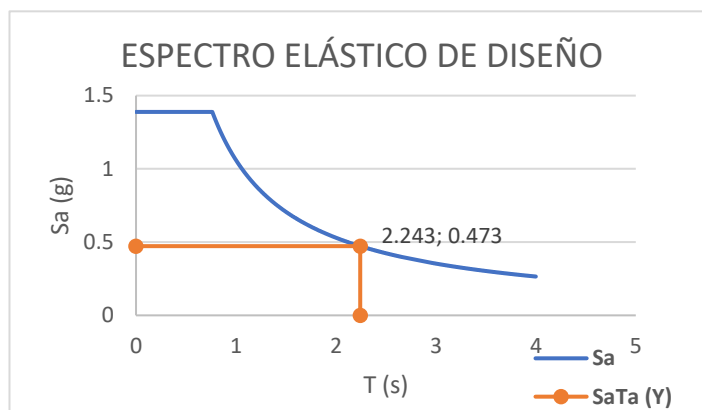
6.5.1 S_a para un T_{ISE} en sentido Y

Utilizando los valores de la tabla 25, calculamos los factores C y K:

Tabla 63. Coeficientes para cálculo de Cortante Basal y FHEY

Coeficientes para cálculo de Cortante Basal y FHEY	
$T_a Y =$	2.243 s
$I =$	1.00
$S_a T_a(Y) =$	0.473 g
$R =$	8.00
$\phi_p =$	1.00
$\phi_E =$	1.00
$C =$	0.059
$K =$	1.872
$V =$	385.6 t

Figura 37. S_a para T_{ISE} en sentido Y, estructura A



6.5.2 Patrón de Cargas sentido Y

Creamos un patrón de cargas sísmicas en el sentido Y al cual llamaremos FHEY:

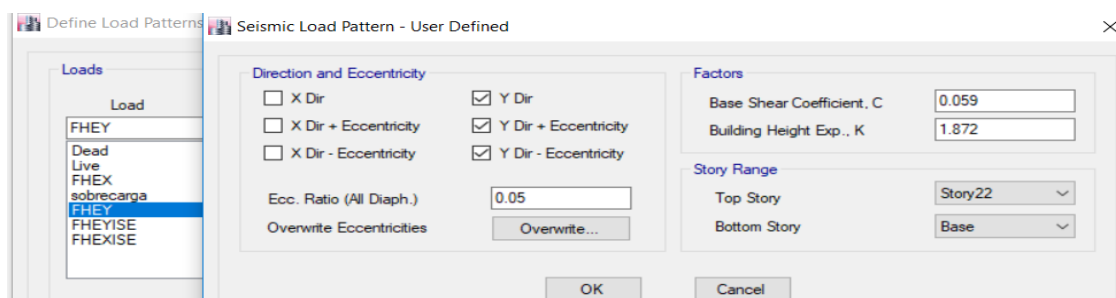


Figura 38. Patrón de carga sísmica estructura A sentido Y, empotrada

6.5.3 Cortante Basal y distribución de fuerzas horizontales en el sentido Y

Para el patrón de carga definido como FHEY, se tiene la siguiente distribución:

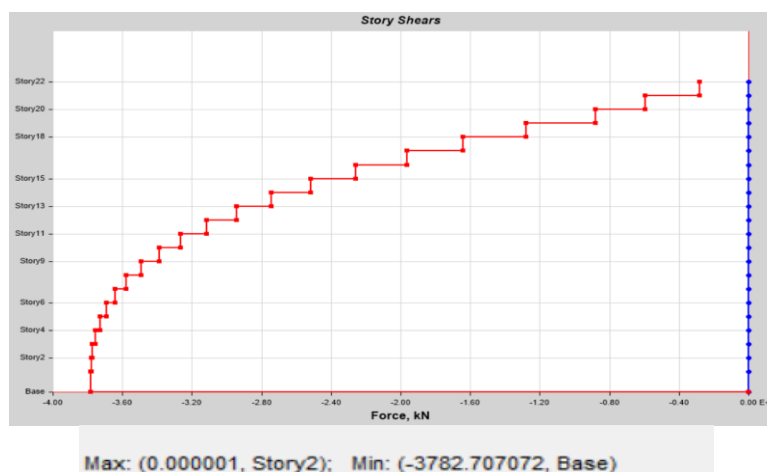


Figura 39. Distribución de fuerzas horizontales en sentido Y, estructura A, empotrada.

6.5.3 Desplazamientos máximos y derivas sentido Y, estructura empotrada.

Se obtienen los desplazamientos máximos para las fuerzas aplicadas en el sentido Y:

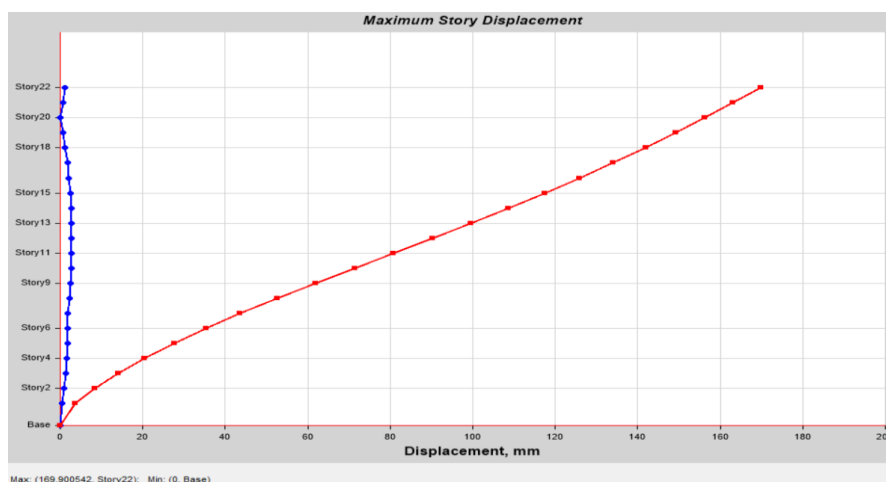


Figura 40. Desplazamiento máximo aplicando las fuerzas horizontales en el sentido Y sin considerar efectos ISE

Tabla 64. Control de derivas, aplicando las fuerzas horizontales en el sentido Y sin considerar efectos ISE

TABLE: Story Response											
Story	Elevation	Location	X-Dir	Y-Dir	Δ	ΔE	ΔM	%	ΔM máx	$\Delta M - \Delta M$ máx	$\Delta M < \Delta M$ máx
	m		mm	mm	mm	mm	mm		mm	mm	
Story22	68.76	Top	1.11	167.4	167.38	6.62	39.74	1.30%	61.2	21.46	ok
Story21	65.7	Top	0.53	160.8	160.76	6.79	40.74	1.33%	61.2	20.46	ok
Story20	62.64	Top	0.14	154	153.97	6.83	40.95	1.34%	61.2	20.25	ok
Story19	59.58	Top	0.71	147.1	147.14	7.19	43.13	1.41%	61.2	18.07	ok
Story18	56.52	Top	1.25	139.9	139.95	7.58	45.49	1.49%	61.2	15.71	ok
Story17	53.46	Top	1.72	132.4	132.37	7.97	47.82	1.56%	61.2	13.38	ok
Story16	50.4	Top	2.11	124.4	124.40	8.33	50.00	1.63%	61.2	11.20	ok
Story15	47.34	Top	2.42	116	116.07	8.65	51.93	1.70%	61.2	9.27	ok
Story14	44.28	Top	2.64	107.4	107.42	8.92	53.55	1.75%	61.2	7.65	ok
Story13	41.22	Top	2.77	98.45	98.49	9.13	54.79	1.79%	61.2	6.41	ok
Story12	38.16	Top	2.82	89.32	89.36	9.27	55.61	1.82%	61.2	5.59	ok
Story11	35.1	Top	2.78	80.04	80.09	9.32	55.94	1.83%	61.2	5.26	ok
Story10	32.04	Top	2.67	70.72	70.77	9.30	55.78	1.82%	61.2	5.42	ok
Story9	28.98	Top	2.48	61.42	61.47	9.17	55.04	1.80%	61.2	6.16	ok
Story8	25.92	Top	2.2	52.25	52.30	8.95	53.67	1.75%	61.2	7.53	ok
Story7	22.86	Top	1.86	43.31	43.35	8.19	49.13	1.61%	61.2	12.07	ok
Story6	19.8	Top	1.8	35.12	35.16	7.65	45.90	1.50%	61.2	15.30	ok
Story5	16.74	Top	1.75	27.46	27.51	7.09	42.56	1.39%	61.2	18.64	ok
Story4	13.68	Top	1.6	20.36	20.42	6.43	38.58	1.26%	61.2	22.62	ok
Story3	10.62	Top	1.34	13.93	13.99	5.61	33.69	1.10%	61.2	27.51	ok
Story2	7.56	Top	0.97	8.321	8.38	4.65	27.89	0.91%	61.2	33.31	ok
Story1	4.5	Top	0.5	3.695	3.73	3.73	22.37	0.50%	90.00	67.63	ok
Base	0	Top	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00%	61.2	61.20	ok

En el sentido Y las derivas producto de fuerzas horizontales no exceden los límites permitidos.

6.6 Cálculo de efectos ISE en el sentido Y

Tabla 65. Parámetros para cálculo de periodo ISE en el sentido Y, estructura A

Parámetros de la estructura	
Masa equivalente $m_e(t-s2/m)$	481.5123
% masa participante	71.690%
Período equivalente $T_e(s)$	2.243
Altura equivalente $H_e(m)$	51.57
Rigidez equivalente $K_e(t/m)$	3778.405
Fracción de amortiguamiento de la estructura $\xi\%$	5%
Amortiguamiento de la estructura $C_e(t-s/m)$	134.883
Frecuencia circular $\omega_e(rad/s)$	2.801
Altura total $H_t=H_e+D(m)$	54.97
Parámetros de la fundación	
Base(m)	14.05
Profundidad(m)	20.4
Desplante $D(m)$	3.40
Radio horizontal $R_h(m)$	9.55
Radio de cabeceo $R_c(m)$	10.61
Parámetros del suelo	
Módulo de cortante $G(t/m^2)$	7841.04
Velocidad equivalente del suelo $V_s(m/s)$	226.452
Coefficiente de poisson ν	0.45
Amortiguamiento del suelo $\xi_s\%$	5%
Profundidad del suelo $H_s(m)$	30
Periodo del estrato $T_s(s)$	0.53

Tabla 66. Función de transferencia, sentido Y, edificio A

$T_i(s)$	$W_e^2 \cdot U / \ddot{X}_g$	T_i/T_e
0	0.000	0.000
0.30	0.015	0.134
0.60	0.066	0.267
0.90	0.162	0.401
1.20	0.332	0.535
1.50	0.637	0.669
1.80	1.271	0.802
2.10	3.097	0.936
2.243	5.630	1.00
2.40	10.603	1.07
2.405	10.606	1.072
2.70	4.392	1.204
3.00	2.706	1.337
3.30	2.094	1.471
3.60	1.784	1.605
4.00	1.553	1.783

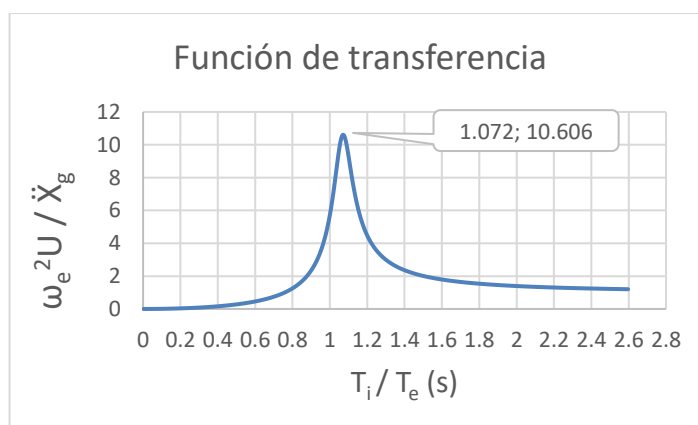


Figura 41. Función de transferencia, sentido Y, edificio A

El punto máximo corresponde a:

$$\frac{\ddot{U}}{\ddot{X}_s} \text{ máx} = 10.606 \qquad \frac{T_i}{T_e} = 1.072$$

Por lo tanto:

$$T_{ise}Y = 1.072 * 2.243 \text{ s} \qquad T_{ise}Y = 2.405 \text{ s}$$

Se calcula el amortiguamiento con el valor máximo de la función:

$$\xi_{ise}Y = \frac{1}{2(W_e^2 \cdot U/\ddot{X}_g)} \qquad \xi_{ise}Y = \frac{1}{2(\mathbf{10.606})} \qquad \xi_{ise}Y = \mathbf{4.714 \%}$$

7. Efectos ISE en estructura A con características de suelo blando, caso hipotético

Se varía la velocidad de onda de corte del estrato equivalente a $V_s = 180$ m/s, esto con el fin de permanecer dentro del espectro para suelos tipo D y poder hacer referencia a los resultados de la estructura empotrada y además es muy posible encontrarse con suelo de estas características en la ciudad de Atacames, zona en estudio.

7.1 Parámetros para estructura A, tipo de suelo D con $V_s = 180$ m/s (hipotético)

Tabla 67. Parámetros estructura A, caso hipotético

Parámetros de la estructura	
Masa equivalente $m_e(t \cdot s^2/m)$	516.036
% masa participante	76.83%
Período equivalente $T_e(s)$	2.873
Altura equivalente $H_e(m)$	51.57
Rigidez equivalente $K_e(t/m)$	2468.13
Fracción de amortiguamiento de la estructura $\xi\%$	5%
Amortiguamiento de la estructura $C_e(t \cdot s/m)$	112.856
Frecuencia circular $\omega_e(rad/s)$	2.187
Altura total $H_t = H_e + D(m)$	54.97
Parámetros de la fundación	
Base(m)	20.40
Profundidad(m)	14.05
Desplante $D(m)$	3.40
Radio horizontal $R_h(m)$	9.55
Radio de cabeceo $R_c(m)$	8.80
Parámetros del suelo	
Módulo de cortante $G(t/m^2)$	4957.20
Velocidad equivalente del suelo $V_s(m/s)$	180
Coefficiente de poisson ν	0.45
Amortiguamiento del suelo $\xi_s\%$	5%
Profundidad del suelo $H_s(m)$	30.00
Período del estrato $T_s(s)$	0.67

7.2 Análisis de efectos ISE

Tabla 68. Función de transferencia edificio A, suelo con $V_s = 180$ m/s

$T_i(s)$	$W_e^2 \cdot U / \ddot{X}_g$	T_i / T_e
0	0.000	0.000
0.30	0.008	0.104
0.60	0.036	0.209
0.90	0.085	0.313
1.20	0.162	0.418
1.80	0.461	0.627
2.10	0.754	0.731
2.70	2.408	0.940
2.873	3.843	1.00
3.200	10.894	1.114
3.24	10.540	1.128
3.60	4.380	1.253
3.70	3.74	1.29
3.90	2.956	1.357

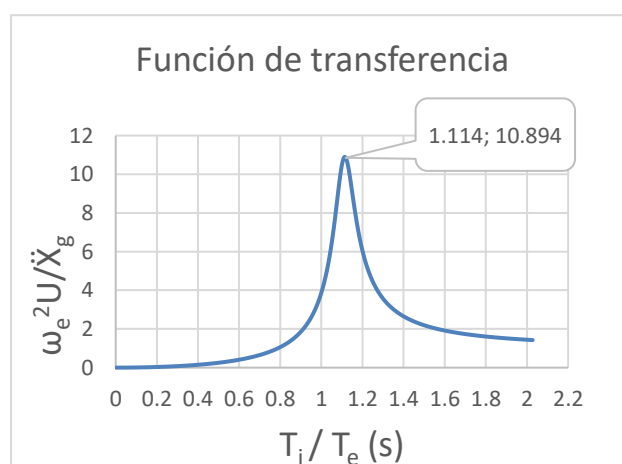


Figura 42. Función de transferencia edificio A, suelo con $V_s = 180$ m/s

Tabla 69. Coeficientes para cálculo de Cortante Basal y FHEX, suelo $V_s=180$ m/s

Coeficientes para cálculo de Cortante Basal y FHEX	
$T_{ise} =$	3.200
$\xi_{ise} =$	4.6%
$I =$	1.00
$S_a(T_{ise}) =$	0.331 g
$S_a(T_{ise})^* =$	0.34 g
$R =$	8.00
$\phi_p =$	1.00
$\phi_E =$	1.00
$C =$	0.04
$K =$	2
$V =$	2564.547 KN

* S_a considerando amortiguamiento ISE

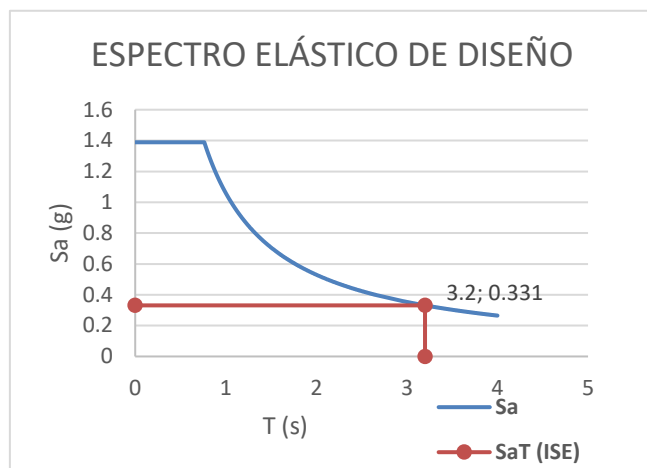


Figura 43. S_a para T_{ISE} en sentido X, estructura A suelo $V_s=180$ m/s

7.3 Desplazamientos máximos y derivas

Tabla 70. Control de derivas, aplicando las fuerzas horizontales en el sentido X con efectos ISE, para suelo hipotético $V_s=180$ m/s, edificio A

TABLE: Story Response											
Story	Elevation	Location	X-Dir	Y-Dir	Δ	ΔE	ΔM	%	ΔM máx	$\Delta M - \Delta M$ máx	$\Delta M < \Delta M$ máx
	m		mm	mm	mm	mm	mm		mm	mm	
Story22	68.76	Top	172.7	8.7	172.87	4.11	24.64	0.81%	61.2	36.56	ok
Story21	65.7	Top	168.6	7.6	168.77	4.52	27.10	0.89%	61.2	34.10	ok
Story20	62.64	Top	164.1	6.9	164.25	4.23	25.35	0.83%	61.2	35.85	ok
Story19	59.58	Top	159.9	6.5	160.03	5.81	34.87	1.14%	61.2	26.33	ok
Story18	56.52	Top	154.1	6.1	154.21	6.50	39.00	1.27%	61.2	22.20	ok
Story17	53.46	Top	147.6	5.6	147.71	7.18	43.06	1.41%	61.2	18.14	ok
Story16	50.4	Top	140.4	5.2	140.54	7.81	46.86	1.53%	61.2	14.34	ok
Story15	47.34	Top	132.6	4.8	132.73	8.38	50.29	1.64%	61.2	10.91	ok
Story14	44.28	Top	124.3	4.3	124.35	8.88	53.31	1.74%	61.2	7.89	ok
Story13	41.22	Top	115.4	3.9	115.46	9.31	55.88	1.83%	61.2	5.32	ok
Story12	38.16	Top	106.1	3.4	106.15	9.66	57.95	1.89%	61.2	3.25	ok
Story11	35.1	Top	96.45	2.9	96.49	9.92	59.54	1.95%	61.2	1.66	ok
Story10	32.04	Top	86.53	2.4	86.57	10.10	60.58	1.98%	61.2	0.62	ok
Story9	28.98	Top	76.45	1.9	76.47	10.18	61.07	2.00%	61.2	0.13	ok
Story8	25.92	Top	66.28	1.4	66.29	9.55	57.29	1.87%	61.2	3.91	ok
Story7	22.86	Top	56.72	1.6	56.74	9.44	56.66	1.85%	61.2	4.54	ok
Story6	19.8	Top	47.27	1.8	47.30	9.34	56.02	1.83%	61.2	5.18	ok
Story5	16.74	Top	37.92	1.8	37.96	9.10	54.63	1.79%	61.2	6.57	ok
Story4	13.68	Top	28.81	1.7	28.86	8.70	52.20	1.71%	61.2	9.00	ok
Story3	10.62	Top	20.1	1.5	20.16	8.00	47.98	1.57%	61.2	13.22	ok
Story2	7.56	Top	12.11	1.1	12.16	6.84	41.03	1.34%	61.2	20.17	ok
Story1	4.5	Top	5.287	0.6	5.32	5.32	31.94	0.71%	90.00	58.06	ok
Base	0	Top	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00%	61.2	61.20	ok

Esta vez, con un suelo más blando de tipo D, los efectos sobre el período de la estructura debido a la interacción suelo estructura, han conseguido disminuir los desplazamientos horizontales y con esto se cumple los requisitos de la norma.

7.3.1 Reducción de los desplazamientos horizontales máximos por efectos ISE en el sentido X suelo hipotético.

Tabla 71. Reducción de desplazamientos por efecto ISE en estructura A, parámetros de suelo más blando

ΔM mm	ΔM (ISE) mm	% de reducción de desplazamiento
28.33	24.64	14.98%
31.16	27.1	14.98%
29.15	25.35	14.99%
40.09	34.87	14.97%
44.86	39	15.03%
49.52	43.06	15.00%
53.88	46.86	14.98%
57.84	50.29	15.01%
61.31	53.31	15.01%
64.26	55.88	15.00%
66.64	57.95	15.00%
68.47	59.54	15.00%
69.67	60.58	15.00%
70.24	61.07	15.02%
65.88	57.29	14.99%
65.16	56.66	15.00%
64.42	56.02	14.99%
62.82	54.63	14.99%
60.02	52.2	14.98%
55.18	47.98	15.01%
47.19	41.03	15.01%
36.73	31.94	15.00%
0	0	0.0%

8. Ejemplo de edificación B

8.1 EDIFICIO B

8.1.1 Descripción, geometría y ubicación del proyecto

El proyecto “Edificio B” consiste en el análisis y diseño de un edificio para huéspedes, consta de una torre, comprenden 13 pisos y un subsuelo que se formará del diseño de la cimentación tipo cajón.

Está ubicado en Ecuador, en la provincia de Guayas, Ciudad de Guayaquil, la implantación es sobre un suelo de tipo E, con $V_s=120$ m/s

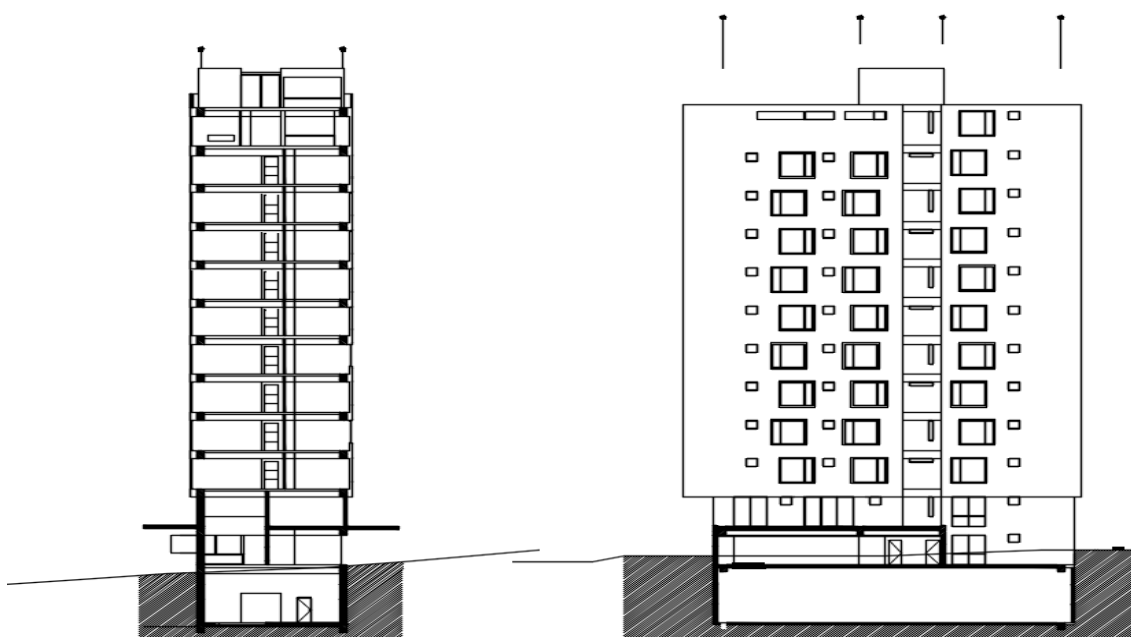


Figura 44. Edificio Malena, Edificio B

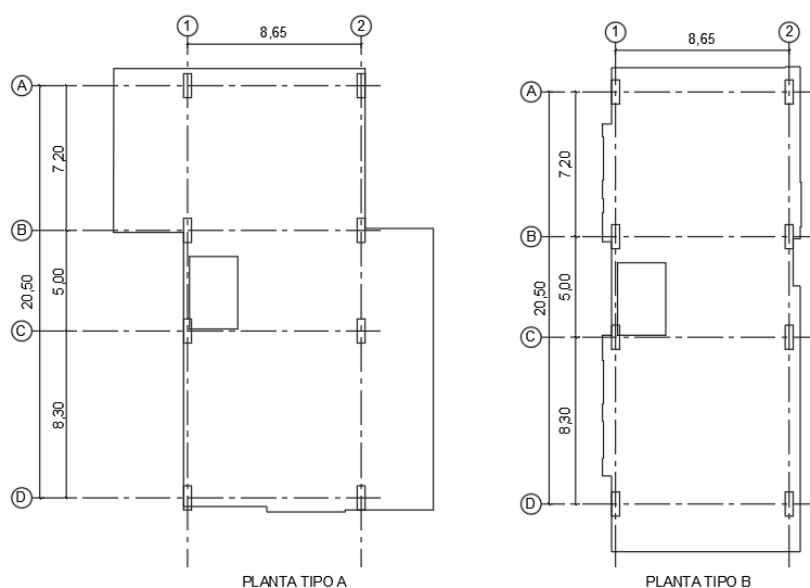


Figura 45. Plantas tipo de edificio B

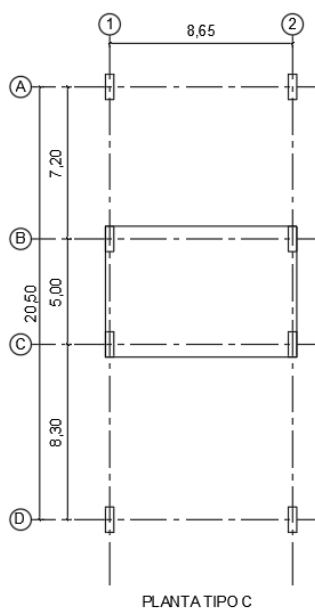


Figura 46. Planta Tipo C

La planta tipo A únicamente corresponde al nivel 3.24m las plantas superiores son similares y del tipo B, son 12 pisos de 3.24m y la cubierta de escaleras y ascensor de tipo C.

Tabla 72. Distribución de plantas en altura edificio A

Distribución de plantas en altura		
Piso	Altura de entrepiso (m)	Planta Tipo
1	3.24	A
2 al 12	3.24	B
13	3.24	C
TOTAL	42.12	

Tabla 73. Secciones edificio tipo B

SECCIONES COLUMNAS Y MUROS		
EJE	TIPO	DIMENSIONES
D1, D2, A2	Muro L	1.00x0.40 e=0.30
A1, B1, B2, C1; C2	Columna	0.40 x 0.80
Ascensor	Muro G	2.00 x 1.95 x 0.57



Figura 47. Secciones de vigas planta tipo A, edificio B

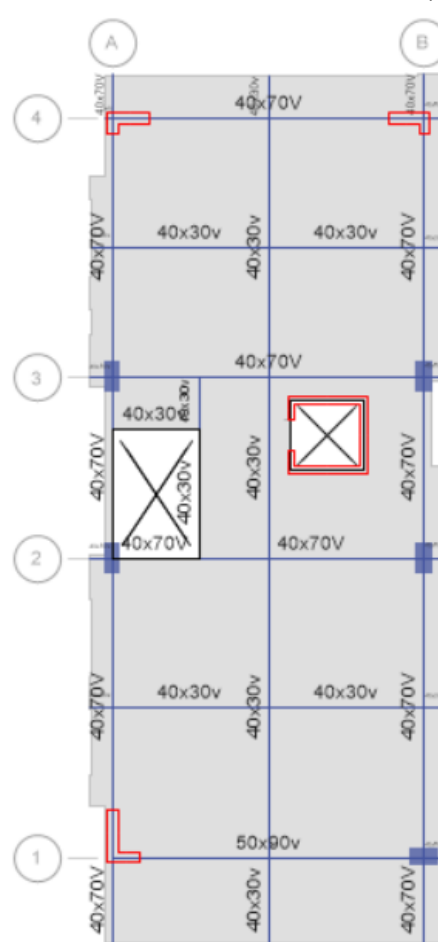


Figura 48. Secciones de vigas, planta tipo B, edificio B

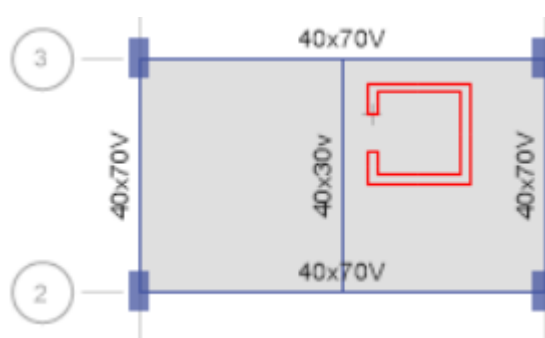


Figura 49. Secciones de vigas planta tipo C, edificio B

8.1.2 Cálculo de las propiedades del suelo edificio B

Teniendo como dato preliminar un suelo de tipo E con $V_s = 120$ m/s que va desde el nivel 0 hasta una profundidad de 30m. se puede calcular el módulo de cortante G con la ecuación 1 y el período del estrato con la ecuación 25, sabiendo que el peso específico es de 1.5 t/m^3

Tabla 74. Parámetros del suelo edificio B

Parámetros del suelo	
$\gamma(\text{t/m}^3)$	1.5
$\rho(\text{t.s}^2/\text{m}^4)$	0.153
Módulo de cortante $G(\text{t/m}^2)$	2203.20
Velocidad equivalente del suelo $V_s(\text{m/s})$	120
Coefficiente de poisson ν	0.4
Amortiguamiento del suelo $\xi\%$	5%
Profundidad del suelo $H_s(\text{m})$	30.00
Periodo del estrato $T_s(\text{s})$	1.00

8.1.3 Cálculo de las propiedades de la estructura con base empotrada del edificio B

8.1.3.1 Modelación del edificio

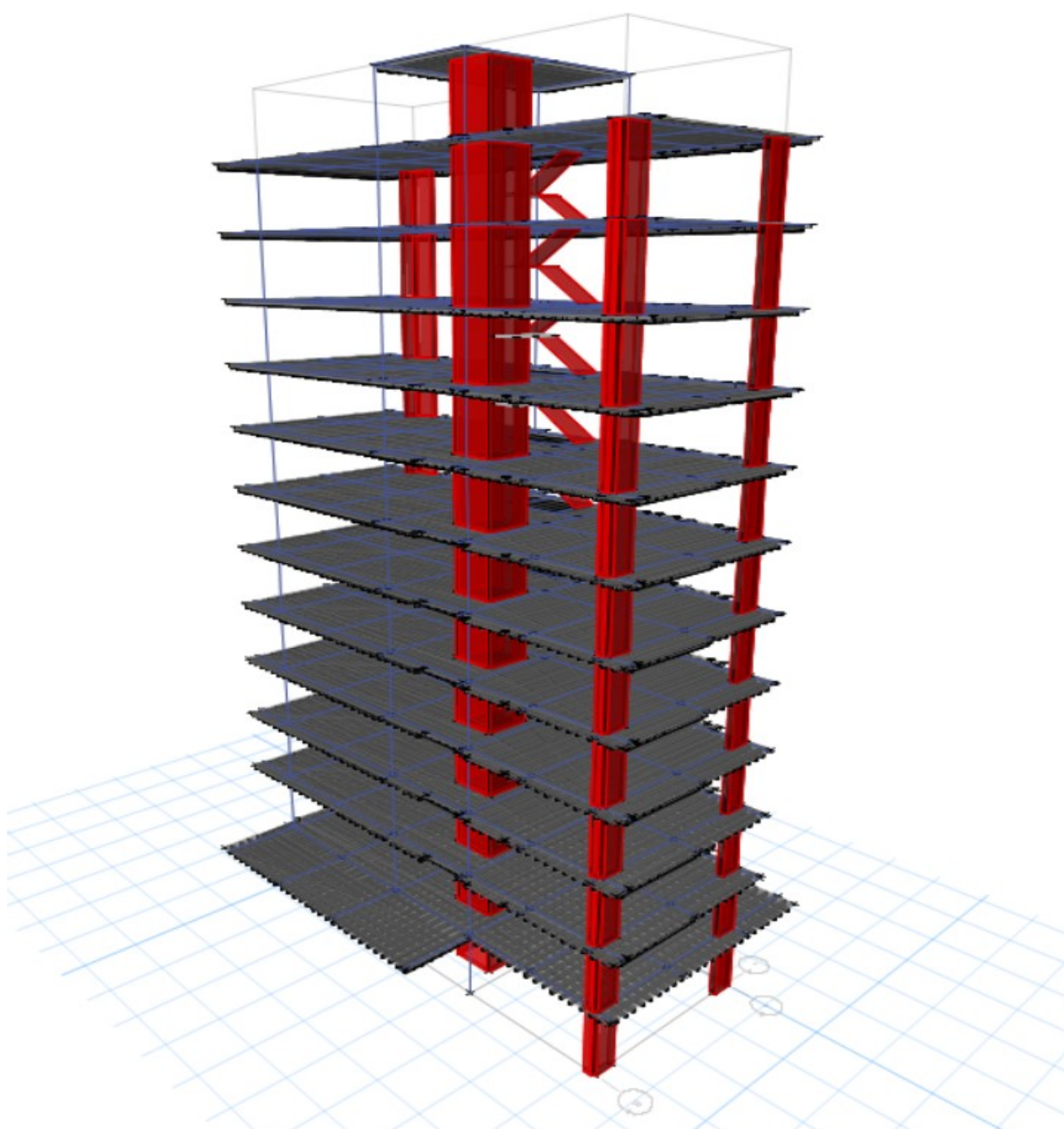


Figura 50. Modelo de edificio B

8.1.3.2 Resultados del análisis modal de la estructura B empotrada.

Tabla 75. Masa de la estructura B

TABLE: Mass Summary by Group					
Group	Self Mass	Self Weight	Mass X	Mass Y	Mass Z
	kg	kN	kg	kg	kg
All	2058622.3	0	2861414.06	2861414.06	0

Tabla 76. Período y participación modal de estructura B

TABLE: Modal Participating Mass Ratios														
Case	Mode	Period	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ	RX	RY	RZ	Sum RX	Sum RY	Sum RZ
		sec												
Modal	1	1.735	0.709	0.006	0.000	0.709	0.006	0.000	0.002	0.288	0.003	0.002	0.288	0.003
Modal	2	1.560	0.006	0.730	0.000	0.715	0.735	0.000	0.271	0.002	0.001	0.272	0.290	0.004
Modal	3	1.379	0.005	0.000	0.000	0.720	0.736	0.000	0.001	0.000	0.758	0.273	0.290	0.762
Modal	4	0.483	0.128	0.002	0.000	0.848	0.738	0.000	0.007	0.353	0.000	0.280	0.643	0.762

8.1.4 Parámetros de la fundación

8.1.4.1 Geometría de la fundación tipo cajón edificio B

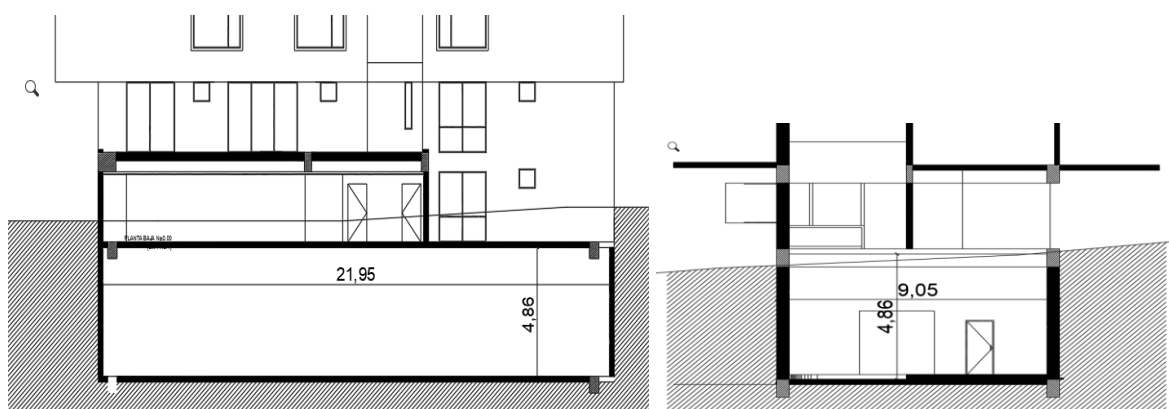


Figura 51. Cimentación edificio B

8.1.4.2 Radio Horizontal y Radio de cabeceo en el sentido X

Tabla 77. Radio horizontal y radio de cabeceo fundación edificio B

Parámetros de la fundación	
Base(m)	21.95
Profundidad(m)	9.05
Desplante D(m)	4.86
Radio horizontal Rh(m)	7.95
Radio de cabeceo Rc(m)	6.45

8.1.5 Criterios de diseño para edificación B.

8.1.5.1 Espectro elástico de diseño para la ciudad de Guayaquil para suelo tipo E.

η: Razón entre la aceleración espectral S_a a período estructural $T = 0.1$ s y el PGA para el período de retorno seleccionado. Su valor depende de la región del Ecuador.					
Región del Ecuador		η			
Provincias de la costa excepto Esmeraldas		1.80			
Z: Aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad g					
Factor de Zona sísmica		Z			
V		0.4			
F_a: Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto.					
F_d: Amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca					
F_s: Comportamiento no lineal de los suelos					
r: Factor usado en el espectro de diseño elástico, cuyos valores dependen de la ubicación geográfica del proyecto					
$r = 1$ para todos los suelos, con excepción del suelo tipo E					
$r = 1.5$ para tipo de suelo E.					
Tipo de perfil del subsuelo		F_a	F_d	F_s	r
E		1	1.6	1.9	1.5
To		0.304			
Tc		1.672			

Tabla 78. Espectro elástico de diseño suelo tipo E, zona 5

T (s)	S_a (g)
0.000	0.720
1.672	0.720
0.800	0.720
1.000	0.720
1.500	0.720
2.000	0.550
2.500	0.394
3.000	0.300
3.500	0.238
4.000	0.195

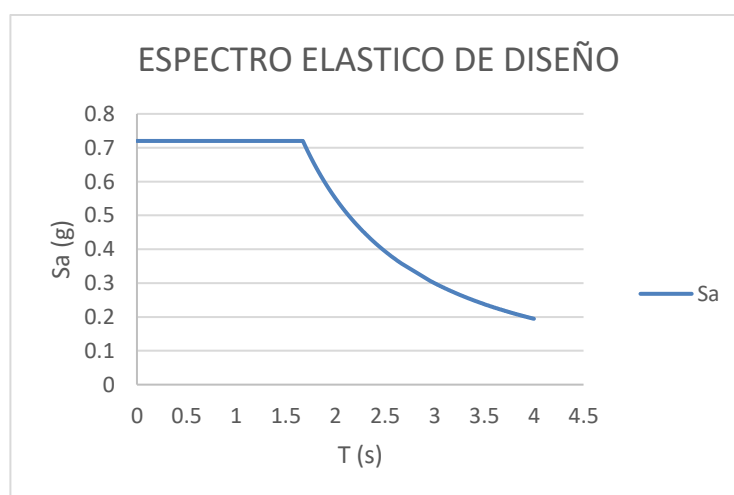


Figura 52. Espectro elástico de diseño para suelo tipo E zona V

8.1.5.2 Cortante Basal calculado para estructura empotrada sentido X

Tabla 79. Coeficientes para cálculo de cortante basal y FHEX estructura B

Coeficientes para cálculo de Cortante Basal y FHE	
Ta =	1.735 s
I=	1.00
SaTa(x)=	0.681 g
R=	8.00
ϕ_p =	1.00
ϕ_E =	1.00
C=	0.085
K=	1.618
V=	241.55 t

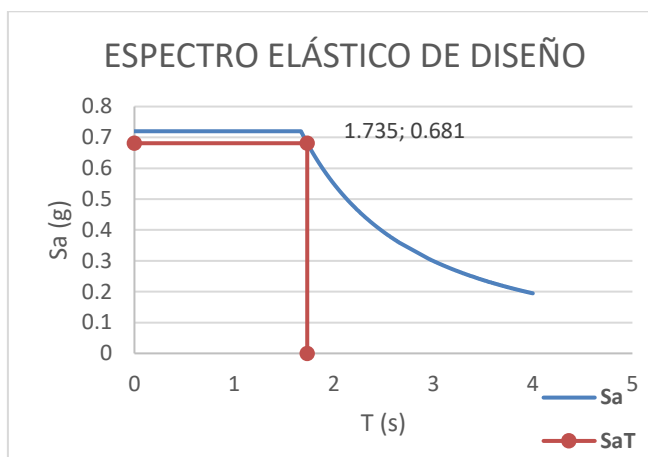


Figura 53. Sa para Te estructura B sentido X

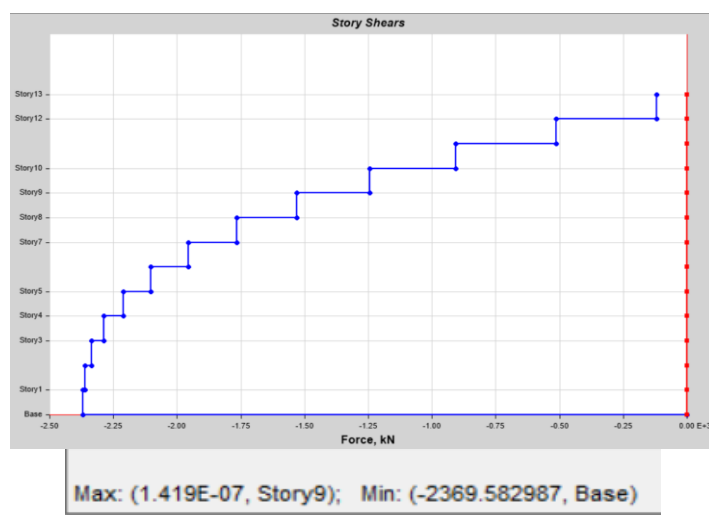


Figura 54. Distribución de cortante para sentido X, estructura B

8.1.5.3 Derivas y desplazamientos máximos para estructura B con base empotrada en el sentido X.

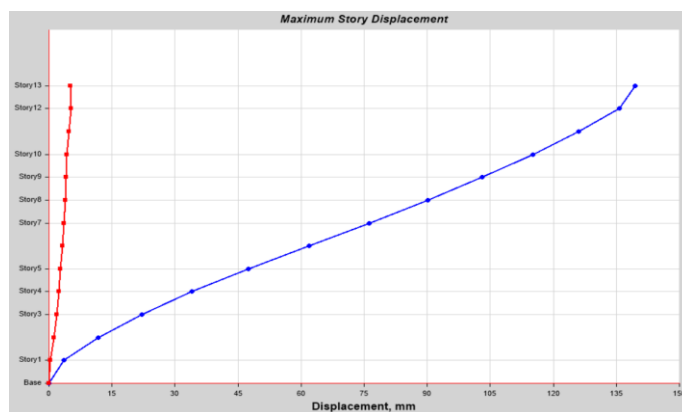


Figura 55. Desplazamientos máximos para FHEX, estructura B

Tabla 80. Control de derivas, aplicando las fuerzas horizontales en el sentido X sin considerar efectos ISE, edificio B

TABLE: Story Response											
Story	Elevation	Location	X-Dir	Y-Dir	Δ	ΔE	ΔM	%	ΔM máx	$\Delta M - \Delta M$ máx	$\Delta M < \Delta M$ máx
	m		mm	mm	mm	mm	mm		mm	mm	
Story13	42.12	Top	139.463	5.109	139.56	3.68	22.08	0.68%	64.8	42.72	ok
Story12	38.88	Top	135.771	5.336	135.88	9.80	58.78	1.81%	64.8	6.02	ok
Story11	35.64	Top	125.992	4.691	126.08	10.94	65.62	2.03%	64.8	-0.82	no cumple
Story10	32.4	Top	115.067	4.171	115.14	11.99	71.97	2.22%	64.8	-7.17	no cumple
Story9	29.16	Top	103.069	4.042	103.15	12.98	77.87	2.40%	64.8	-13.07	no cumple
Story8	25.92	Top	90.088	3.847	90.17	13.83	82.97	2.56%	64.8	-18.17	no cumple
Story7	22.68	Top	76.256	3.629	76.34	14.37	86.23	2.66%	64.8	-21.43	no cumple
Story6	19.44	Top	61.888	3.212	61.97	14.42	86.55	2.67%	64.8	-21.75	no cumple
Story5	16.2	Top	47.464	2.803	47.55	13.39	80.36	2.48%	64.8	-15.56	no cumple
Story4	12.96	Top	34.074	2.328	34.15	11.91	71.46	2.21%	64.8	-6.66	no cumple
Story3	9.72	Top	22.172	1.787	22.24	10.53	63.19	1.95%	64.8	1.61	ok
Story2	6.48	Top	11.656	1.146	11.71	8.17	48.99	1.51%	64.8	15.81	ok
Story1	3.24	Top	3.533	0.309	3.55	3.55	21.28	0.66%	64.8	43.52	ok
Base	0	Top	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00%	64.8	64.80	ok

8.1.6 Análisis de efectos ISE en el sentido X para edificación B

Tabla 81. Parámetros para cálculo de efectos ISE estructura B, sentido X

Parámetros de la estructura	
Masa equivalente $m_e(t-s^2/m)$	206.8619
% masa participante	70.920%
Período equivalente $T_e(s)$	1.735
Altura equivalente $H_e(m)$	31.59
Rigidez equivalente $K_e(t/m)$	2712.946
Fracción de amortiguamiento de la estructura $\xi\%$	5%
Amortiguamiento de la estructura $C_e(t-s/m)$	74.914
Frecuencia circular $\omega_e(rad/s)$	3.621
Altura total $H_t=H_e+D(m)$	36.45
Parámetros de la fundación	
Base(m)	21.95
Profundidad(m)	9.05
Desplante $D(m)$	4.86
Radio horizontal $R_h(m)$	7.95
Radio de cabeceo $R_c(m)$	6.45
Parámetros del suelo	
Módulo de cortante $G(t/m^2)$	2203.20
Velocidad equivalente del suelo $V_s(m/s)$	120
Coefficiente de poisson ν	0.4
Amortiguamiento del suelo $\xi_s\%$	5%
Profundidad del suelo $H_s(m)$	30.00
Periodo del estrato $T_s(s)$	1.00

Tabla 82. Función de transferencia edificio B, sentido X

$T_i(s)$	$W_e^2 \cdot U / \ddot{X}_g$	T_i/T_e
0	0.000	0.000
0.30	0.018	0.173
0.60	0.083	0.346
0.90	0.213	0.519
1.20	0.458	0.692
1.735	1.924	1.000
2.00	6.156	1.153
2.130	11.372	1.228
2.30	6.014	1.33
2.60	2.945	1.499
2.90	2.137	1.671
3.20	1.777	1.844
3.50	1.576	2.02
3.80	1.449	2.190
4.00	1.389	2.305

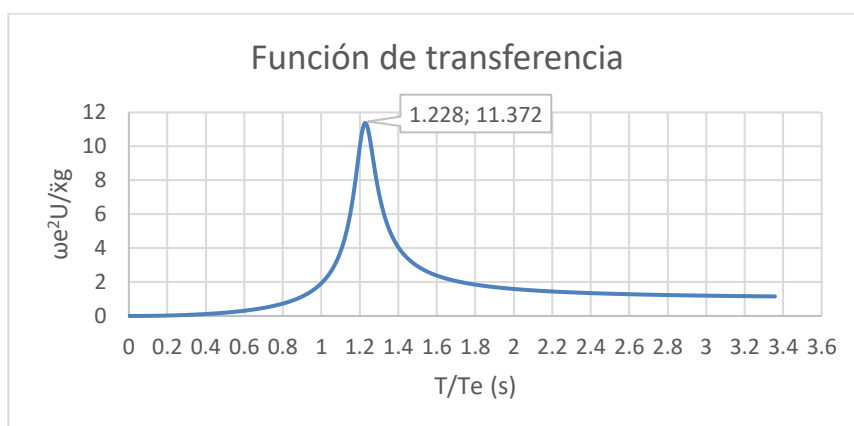


Figura 56. Función de transferencia, edificio B, sentido X

El punto máximo corresponde a:

$$\frac{\ddot{U}}{\ddot{X}_g} \text{ máx} = 11.372 \qquad \frac{T_i}{T_e} = 1.228$$

Por lo tanto:

$$T_{iseX} = 1.228 * 1.735 \text{ s} \qquad T_{iseX} = 2.130 \text{ s}$$

Se calcula el amortiguamiento con el valor máximo de la función:

$$\xi_{iseX} = \frac{1}{2(W_e^2 \cdot U / \ddot{X}_g)} \qquad \xi_{iseX} = \frac{1}{2(11.372)} \qquad \xi_{iseX} = 4.40 \%$$

8.1.7 Cortante Basal calculado para estructura con efectos ISE sentido X.

Tabla 83. Coeficientes para cálculo de cortante basal y FHEX con ISE estructura B

Coeficientes para cálculo de Cortante Basal y FHE	
Ta ISE =	2.130 s
ξ_{ise} =	4.4%
I=	1.00
SaTa(ISE)=	0.501 g
SaTa(ISE)*=	0.527g
R=	8.00
ϕ_p =	1.00
ϕ_E =	1.00
C=	0.066
K=	1.815
V=	179.03 t

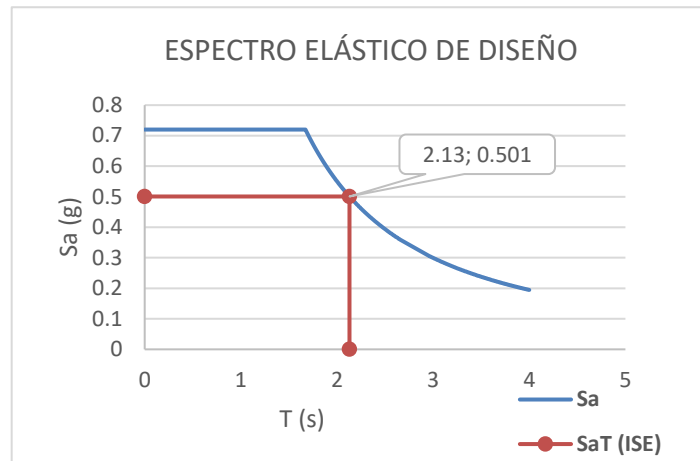


Figura 57. Sa para Tise estructura B, sentido X

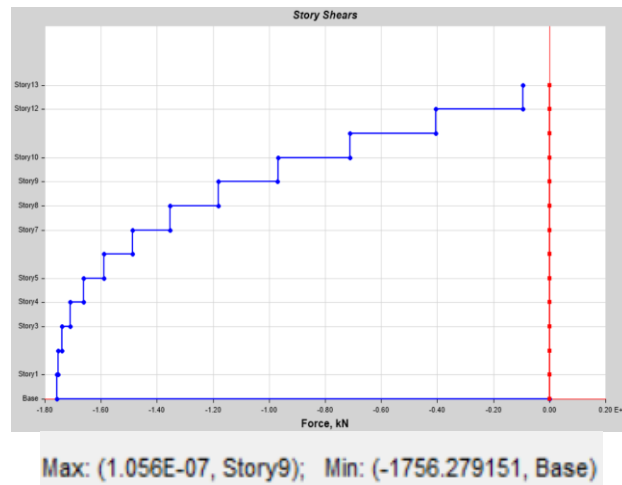


Figura 58. Distribución de cortante para sentido X, estructura B con ISE

8.1.8 Derivas y desplazamientos máximos para edificio B con efectos ISE en el sentido X.

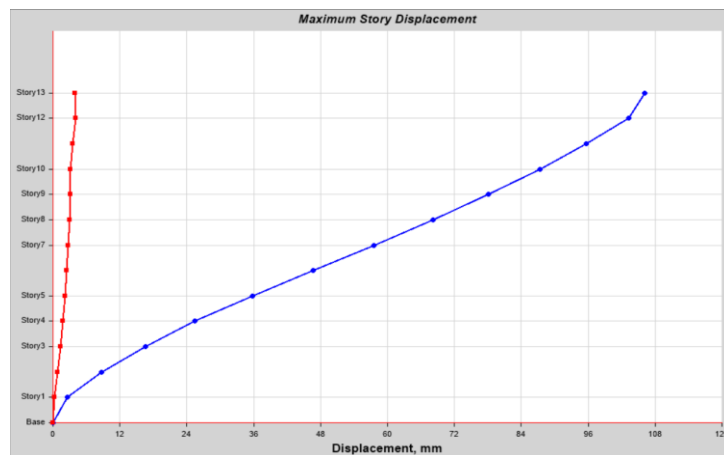


Figura 59. Desplazamientos máximos para FHEX con ISE, estructura B

Tabla 84. Control de derivas, aplicando las fuerzas horizontales en el sentido X con efectos ISE, edificio B

TABLE: Story Response											
Story	Elevation	Location	X-Dir	Y-Dir	Δ	ΔE	ΔM	%	ΔM máx	$\Delta M - \Delta M$ máx	$\Delta M < \Delta M$ máx
	m		mm	mm	mm	mm	mm		mm	mm	
Story13	42.12	Top	106.086	3.918	106.16	2.84	17.02	0.53%	64.8	47.78	ok
Story12	38.88	Top	103.241	4.096	103.32	7.55	45.30	1.40%	64.8	19.50	ok
Story11	35.64	Top	95.704	3.6	95.77	8.42	50.52	1.56%	64.8	14.28	ok
Story10	32.4	Top	87.293	3.19	87.35	9.21	55.27	1.71%	64.8	9.53	ok
Story9	29.16	Top	78.078	3.086	78.14	9.94	59.63	1.84%	64.8	5.17	ok
Story8	25.92	Top	68.137	2.931	68.20	10.75	64.48	1.99%	64.8	0.32	ok
Story7	22.68	Top	57.39	2.7	57.45	10.74	64.43	1.99%	64.8	0.37	ok
Story6	19.44	Top	46.651	2.434	46.71	10.79	64.75	2.00%	64.8	0.05	ok
Story5	16.2	Top	35.86	2.118	35.92	10.38	62.26	1.92%	64.8	2.54	ok
Story4	12.96	Top	25.486	1.754	25.55	8.94	53.63	1.66%	64.8	11.17	ok
Story3	9.72	Top	16.554	1.343	16.61	7.88	47.27	1.46%	64.8	17.53	ok
Story2	6.48	Top	8.688	0.859	8.73	6.09	36.54	1.13%	64.8	28.26	ok
Story1	3.24	Top	2.63	0.226	2.64	2.64	15.84	0.49%	64.8	48.96	ok
Base	0	Top	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00%	64.8	64.80	ok

En este caso y para el sentido X se consigue una reducción de los desplazamientos máximos y los valores resultan dentro de lo señalado por la norma.

El ejemplo practicado con la edificación B, en un suelo de tipo E, suelo muy blando, supuso un aumento del 22% en el período cuando se consideran los efectos ISE

8.2 Reducción de los desplazamientos horizontales máximos por efectos ISE en el sentido X edificio B

Tabla 85. Reducción de desplazamientos por efecto ISE en edificio B sentido X

ΔM mm	ΔM (ISE) mm	% de reducción de desplazamiento
22.08	17.02	29.7%
58.78	45.3	29.8%
65.62	50.52	29.9%
71.97	55.27	30.2%
77.87	59.63	30.6%
82.97	64.48	28.7%
86.23	64.43	33.8%
86.55	64.75	33.7%
80.36	62.26	29.1%
71.46	53.63	33.2%
63.19	47.27	33.7%
48.99	36.54	34.1%
21.28	15.84	34.3%
0	0	

9. Valores paramétricos

9.1 Valores paramétricos edificio A

a) Relación de masas

$$R_M = \frac{m_c}{m_e} = \frac{36.47}{291.683} = 0.054 \quad (36)$$

b) Relación de inercias

$$R_I = \frac{J_c}{J_e} = \frac{3.40^3}{68.76^3} = 0.00012 \quad (37)$$

c) Densidad relativa

$$D_R = \frac{\rho_e}{\rho_s} = \frac{0.22 \frac{T}{m^3}}{1.53 \frac{T}{m^3}} = 0.14 \quad (38)$$

d) Profundidad relativa

$$P_R = \frac{H_s}{R_h} = \frac{30.00 \text{ m}}{9.55 \text{ m}} = 3.14 \quad (39)$$

e) Profundidad de desplante

$$P_D = \frac{D}{R_h} = \frac{3.40 \text{ m}}{9.55 \text{ m}} = 0.36 \quad (40)$$

f) Relación de esbeltez

$$R_E = \frac{H_e}{R_h} = \frac{51.57 \text{ m}}{9.55 \text{ m}} = 5.40 \quad (41)$$

g) Rigidez relativa

$$R_R = \frac{H_e/T_e}{H_s/T_s} = \frac{51.57\text{m}/2.873\text{s}}{30.00\text{m}/0.53\text{s}} = 0.317 \quad \text{Tomando el caso práctico según 5.1.2}$$

$$R_R = \frac{H_e/T_e}{H_s/T_s} = \frac{51.57\text{m}/2.873\text{s}}{30.00\text{m}/0.67\text{s}} = 0.40 \quad (42) \text{ Para caso hipotético según 7.1}$$

9.2 Valores paramétricos edificio B (relevantes)

a) Profundidad relativa

$$P_R = \frac{H_s}{R_h} = \frac{30.00 \text{ m}}{7.95 \text{ m}} = 3.77 \quad (39)$$

b) Profundidad de desplante

$$P_D = \frac{D}{R_h} = \frac{4.86 \text{ m}}{7.95 \text{ m}} = 0.61 \quad (40)$$

c) Relación de esbeltez

$$R_E = \frac{H_e}{R_h} = \frac{31.59 \text{ m}}{7.95 \text{ m}} = 3.973 \quad (41)$$

d) Rigidez relativa

$$R_R = \frac{H_e/T_e}{H_s/T_s} = \frac{31.59\text{m}/1.735\text{s}}{30.00\text{m}/1.00\text{s}} = 0.607 \quad (42)$$

9.3 Relación entre Rigidez relativa y variación del T_{ISE}

Se calculan los valores de incremento del período en base a una disminución de la rigidez del suelo para ejemplificar la importancia que adquiere incluir efectos ISE en sitios de suelos más blandos (con relación a la del ejemplo real.)

El cálculo del T_{ISE} y ξ_{ISE} de la tabla a continuación se lo realizó paso a paso en el capítulo 5.1.5, se prioriza el cálculo de la rigidez relativa por que de aquí se sabrá si tiene alguna ventaja para el diseñador incluir los efectos ISE o si resultan despreciables.

Tabla 86. Relación de Rigidez vs % aumento T_e .

Relación de Rigidez vs. % Aumento T_e (variando V_s)													
Altura equiv. H_e (m)	Período equivalente estructura T_e (s)	Profundidad del suelo H_s (m)	ρ (t.s ² /m ⁴)	Velocidad equiv. Del suelo V_s (m/s)	Módulo de cortante G (t/m ²)	Periodo del estrato T_s (s)	Rigidez relativa	T_{ise}	T_{ise}/T_e	% aumento T_e	ξ_{ISE}	ξ_{ISE}/ξ ($\xi=5\%$)	% disminu ξ
51.57	2.873	30.00	0.153	226.452	7841.044	0.53	0.317	3.085	1.074	7.38%	4.70%	94.00%	6.0%
51.57	2.873	30.00	0.153	200.00	6120.00	0.60	0.359	3.140	1.093	9.29%	4.65%	93.00%	7.0%
51.57	2.873	30.00	0.153	190.00	5523.30	0.63	0.378	3.170	1.103	10.34%	4.62%	92.40%	7.6%
51.57	2.873	30.00	0.153	180.00	4957.20	0.67	0.399	3.200	1.114	11.38%	4.59%	91.80%	8.2%
51.57	2.873	30.00	0.153	170.00	4421.70	0.71	0.422	3.240	1.128	12.77%	4.56%	91.20%	8.8%
51.57	2.873	30.00	0.153	160.00	3916.80	0.75	0.449	3.280	1.142	14.17%	4.53%	90.60%	9.4%
51.57	2.873	30.00	0.153	150.00	3442.50	0.80	0.479	3.335	1.161	16.08%	4.49%	89.80%	10.2%
51.57	2.873	30.00	0.153	140.00	2998.80	0.86	0.513	3.395	1.182	18.17%	4.45%	89.00%	11.0%
51.57	2.873	30.00	0.153	130.00	2585.70	0.92	0.552	3.470	1.208	20.78%	4.41%	88.20%	11.8%
51.57	2.873	30.00	0.153	120.00	2203.20	1.00	0.598	3.565	1.241	24.09%	4.37%	87.40%	12.6%
51.57	2.873	30.00	0.153	110.00	1851.30	1.09	0.653	3.685	1.283	28.26%	4.33%	86.60%	13.4%

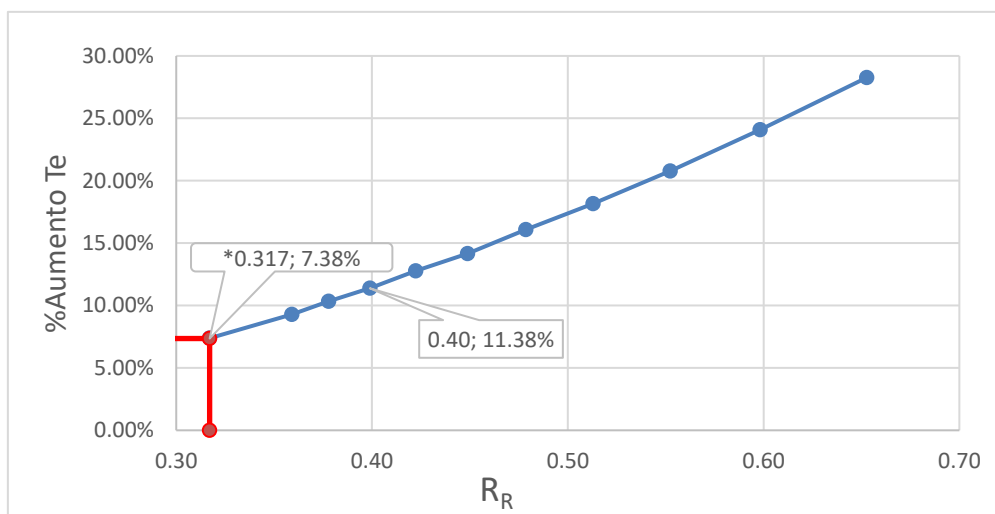


Figura 60. Rigidez relativa vs. % Aumento T_e (relación de esbeltez $R_E= 5.40$)

*Señala la rigidez relativa del problema planteado y el porcentaje de incremento del periodo de la estructura cuando se incluyen efectos ISE.

Para diferentes valores de rigidez relativa, producidos por la disminución de la velocidad de onda de corte del suelo, se puede observar que, en suelos menos rígidos es mayor el aumento del período, a la vez que se incrementa el valor de rigidez relativa.

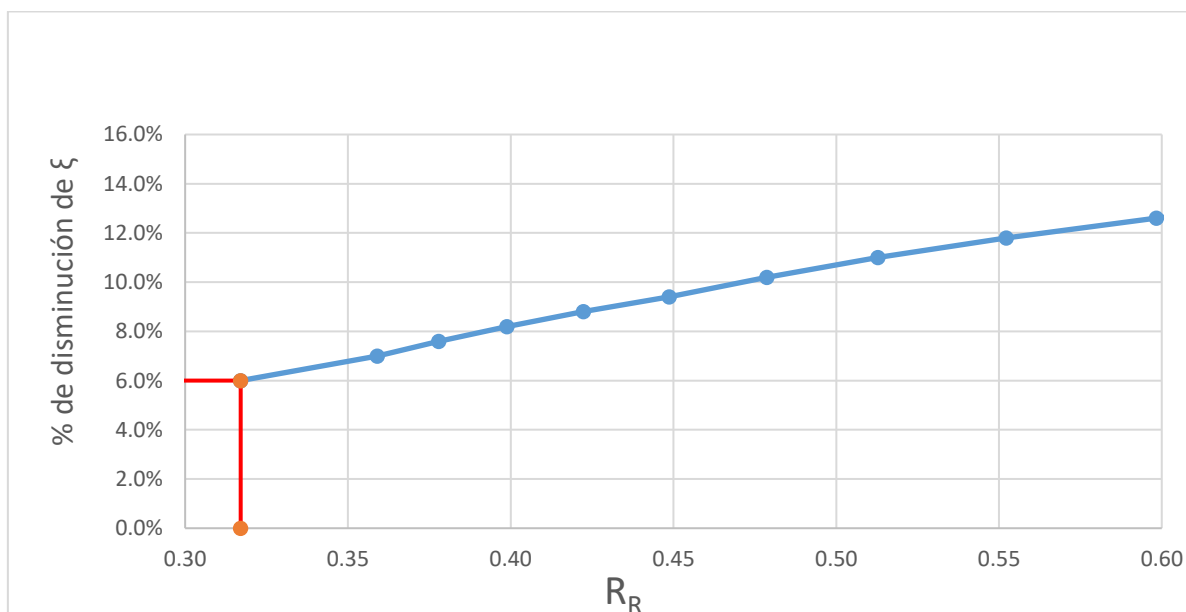


Figura 61. Rigidez relativa vs. % disminución ξ_e (relación de esbeltez $R_E= 5.40$)

9.3 Número de pisos de estructuras que se ubicarían en la curva descendiente del espectro elástico de diseño.

El período T_c en el espectro elástico de diseño señala el punto de inflexión de la curva, es desde ahí que un aumento de período debido a los efectos ISE derivaría en una disminución en la aceleración, generando un valor de cortante basal menor y posteriormente la disminución en los desplazamientos máximos; es por esto que a continuación, utilizando los valores de T_c para suelos tipo D y E para las principales ciudades del país se ha determinado un número aproximado de pisos a partir de los cuales se podría lograr una reducción de la aceleración y posterior reducción de las fuerzas horizontales a aplicarse para el análisis.

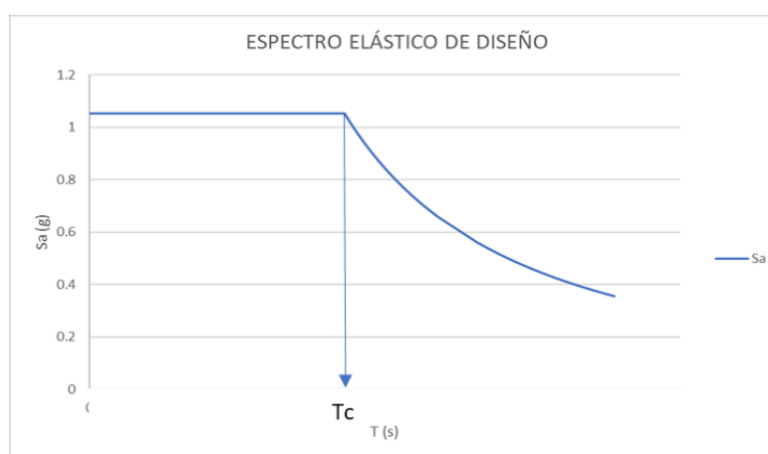


Figura 62. T_c , Período que limita la zona plana del espectro.

Tabla 87. Número de pisos mínimo aproximado que se ubican en la zona descendente del espectro, en suelos blandos, ciudades importantes.

Principales Ciudades del Ecuador	Región del Ecuador	Zona Sísmica	Tipo de perfil de subsuelo	T_c s	H_n m	Número de pisos aproximado para entrepisos de ($h=2.70m$)
Guayaquil	Provincias de la costa excepto Esmeraldas	V	D	0.698	16.83	6
			E	1.672	44.43	16
Quito	Provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos	V	D	0.698	16.83	6
			E	1.672	44.43	16
Cuenca	Provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos	II	D	0.604	14.33	5
			E	1.100	27.90	10
Manta	Provincias de la costa excepto Esmeraldas	VI	D	0.763	18.58	7
			E	1.941	52.44	19
Ambato	Provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos	V	D	0.698	16.83	6
			E	1.672	44.43	16
Esmeraldas	Provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos	VI	D	0.763	18.58	7
			E	1.941	52.44	19

Estructuras de menor número de pisos estarían en la zona plana del espectro y a partir de esta consideración los efectos ISE producirían la variación del período, mas no de la aceleración espectral correspondiente. H_n se ha calculado a partir de la ecuación 28 considerando estructuras tipo pórticos especiales de hormigón armado, sin muros estructurales ni diagonales rigidizadoras. Para el cálculo se utilizan los coeficientes de la tabla 88

Tabla 88. Coeficientes según tipo de edificio

$C_t=$	0.055
$\alpha=$	0.9

10. Conclusiones y Recomendaciones

10.1 Conclusiones

Se realizaron análisis para comparar el comportamiento con ISE y sin ISE en dos edificios reales, el primer edificio se estudió sobre un suelo tipo D con dos velocidades de onda de corte diferentes y el segundo en un suelo tipo E.

El edificio A, caso 1, lo ubicamos inicialmente en un suelo tipo D con $V_s = 226.45$ m/s con una $R_R = 0.317$.

Para el caso 2, sobre el edificio A utilizamos una $V_s = 180$ m/s, suelo tipo D (el mismo espectro elástico de respuesta que el caso 1), presentó una $R_R = 0.40$.

En el tercer caso tenemos al edificio B, implantado sobre un suelo tipo E con $V_s = 180$ m/s y con una $R_R = 0.607$

Luego del análisis ISE se pudo verificar que:

Para el Edificio A, caso 1:

- Se consiguió un aumento del periodo del 7.38%
- El amortiguamiento disminuyó en 6%
- En términos porcentuales; la variación de desplazamientos máximos y derivas producto de los efectos ISE, con relación al sistema empotrado, redujeron aproximadamente 7%

Para el Edificio A, caso 2:

- El periodo aumentó 11.38%
- El amortiguamiento disminuyó en 8%
- Los desplazamientos máximos y derivas redujeron aproximadamente 15%

Para el Edificio B:

- El periodo aumentó 22.80%
- El amortiguamiento disminuyó en 12%
- Los desplazamientos máximos y derivas redujeron entre 30% y 34%

Se puede observar la relación directa que hay entre la Rigidez Relativa y el período ISE en los casos estudiados, mientras mayor es el valor de R_R también hay un mayor porcentaje de incremento del periodo por efectos ISE.

En el caso 1 no bastó para cumplir con la Norma, mientras que en el caso 2 y en el Edificio B la aplicación de este análisis sirvió para cumplir las exigencias vigentes.

Los efectos ISE incrementan el período fundamental de las estructuras y si estas se sitúan en la parte descendente del espectro de diseño se puede aprovechar este efecto para optimizar diseños.

Los suelos blandos incrementan el porcentaje de aumento del período más que los suelos rígidos.

Los efectos ISE en estructuras ubicadas en suelos tipo E serían mayores con relación a las ubicadas en suelos tipo D, sin embargo, el límite de la parte plana del espectro se ve desplazado hacia períodos de estructuras menos rígidas, que en términos prácticos hace que se aplique una reducción de cortante basal a estructuras más altas.

Se observa como la relación de rigidez es un parámetro que nos señala el mayor o menor efecto de interacción suelo estructura.

10.2 Recomendaciones

Teniendo en cuenta que: el análisis de la estructura empotrada nos brinda los parámetros de la estructura y que, para tener el espectro elástico de diseño son necesarios los parámetros del suelo y además que la concepción arquitectónica y a su vez la del diseño de cimentación son preexistentes, realizar el análisis ISE resultaría en la práctica el ingreso en una hoja de cálculo de todos estos parámetros y así el diseñador puede determinar si incluye o no dichos efectos, lo que se recomienda es observar en que porcentaje se logra disminuir S_a para poder usar esto en favor de reducir secciones, resistencias del concreto o a su vez cumplir requisitos de derivas máximas señaladas en la Norma.

La velocidad de propagación a los 30 m. es todavía baja y puede ser que haya un contraste más alto a mayor profundidad. Esto cambiaría de manera importante el periodo de vibración fundamental del depósito, que posteriormente afectarían los parámetros con los que se modela la rigidez y el amortiguamiento del suelo, sin embargo, se consideraron los datos que nos aportan los sondeos realizados para mostrar la metodología de cálculo.

Lista de referencias

- AIRBNB. (2017). Mapa de la ubicación de Estructura A [Figura 2] . Obtenido de <https://www.airbnb.com.co/rooms/8224939>
- AMINATON MARTO, Tan Choy Soon, Fauziah Kasim, (1993) A Correlation of Shear Wave Velocity and Standard Penetration Resistance, obtenido de <http://www.ejge.com/2013/Ppr2013.039alr.pdf>
- AVILÉS, J., PÉREZ, & ROCHA. (1996). Evaluation of interaction effects on the system period and the system damping due to foundation embedment and layer depth, . Soil Dynamics and Earthquake Engineering.
- AVILÉS, J., PÉREZ, & ROCHA. (2004). Bases para las Nuevas Disposiciones Reglamentarias sobre Interacción Dinámica Suelo-Estructura. Revista de Ingeniería Sísmica, No. 71. México.
- AVILÉS, J., PÉREZ, L., & ROCHA, L. (1997). Efectos de Sitio e Interacción Suelo-Estructura en el Valle de México. Memorias del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica,. Veracruz, México.
- BOTERO, J. C. (2004). Evaluación de los efectos inerciales de interacción dinámica suelo-estructura para edificaciones . Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/215/21513407.pdf>
- Braja Das. (2000). principios de ingeniería de cimentaciones. Thomson Editores, S.A. de C.V.
- CHOPRA, A. (2014). Dinámica de estructuras (Murrieta, N). (4 ed.). Monterrey: Pearson Education.
- ESPINOZA, F. (1999). Determinación de Características Dinámicas de Estructuras. Tesis Doctoral de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos y Puertos Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña, España. Obtenido de URL <http://www.tesisenxarxa.net>
- FERNANDEZ, L., AVILES, J. (2008). Efectos de interacción suelo-estructura en edificios con planta baja blanda. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2008000200004
- HUNT, R. (1984). Geotechnical Engineering Investigation Handbook, Taylor & Francis, Boca Raton, Geotechnical Engineering Investigation Handbook, Taylor & Francis, Boca Raton, Florida. Florida.
- KAUSEL, E., WHITMAN, R., MORRAY, J., & ELSABEE, F. (1978). The spring method for embedded foundations. En: Nuclear Engineering and Desing. (Vol. 48).
- KAVAZANJIAN, E., MATASOVIC, N., HADJ-HAMOU, T., & Wang, J. (1998).), Geotechnical Earthquake Engineering, Reference Manual, NHI Course No. 13239, U.S.

Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute, Arlington.

NEC-SE-DS . (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción. Seguridad estructural de las edificaciones. Peligro Sísmico, diseño sismo resistente (Vol. 2).

NEC-SE-GC . (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción. Seguridad estructural de las edificaciones. Geotécnia y Cimentaciones: Propiedades de respuesta sísmica del suelo.

NSR-10. (2010). Reglamento colombiano de construcción sismo resistente. Título H, Estudios geotécnicos: Caracterización geomecánica detallada, Pte. H-12.

ROSENBLUETH, E. (1992). Diseño de Estructuras Resistentes a Sismos. IMCYC Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. México.

SORIANO, A. (1989). Interacción Suelo-Estructura, Modificación del Movimiento. Revista Física de la Tierra, No. 1 . Ed. Univ. Compl. Madrid, España. Madrid, España: Univ. Compl. Obtenido de URL <http://www.ucm.es>